

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ÉMILLYN FERREIRA TREVISANI OLIVIO

**AVALIAÇÃO DE LIGAS DE Ni-AI UTILIZADAS COMO REVESTIMENTO
ESTÁVEIS A ALTAS TEMPERATURAS DEPOSITADAS
POR ASPERSÃO TÉRMICA À CHAMA PÓ**

CURITIBA

2012

ÉMILLYN FERREIRA TREVISANI OLIVIO

**AVALIAÇÃO DE LIGAS DE Ni-AI UTILIZADAS COMO REVESTIMENTO
ESTÁVEIS A ALTAS TEMPERATURAS DEPOSITADAS
POR ASPERSÃO TÉRMICA À CHAMA PÓ**

Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

Co-orientador: Prof. Dr. Hélio Padilha

CURITIBA

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

ÉMILLYN FERREIRA TREVISANI

AVALIAÇÃO DE LIGAS DE NI-AL UTILIZADAS COMO REVESTIMENTO ESTÁVEIS A ALTAS TEMPERATURAS DEPOSITADAS POR ASPERSÃO TÉRMICA À CHAMA PÓ

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Sergio Luiz Henke
Universidade Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Regina Maria H. P. Rodriguez
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Ramón S. Cortés Paredes
Universidade Federal do Paraná
Presidente

Curitiba, 18 de maio de 2012.

DEDICATÓRIA

Ao Paulo, meu marido e a minha
família, que sempre me apoiaram

Aos meus amigos que sempre
estiveram ao meu lado

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes e ao meu co-orientador Hélio Padilha, por acreditarem em mim, me ajudarem no desenvolvimento deste trabalho e acima de tudo serem meus amigos.

A minha família, meus pais, Eder e Elba, minhas irmãs Éwellyn e Jéssika, minha avó Emília, minha tia Erika e meu primo Thalles, por me apoiarem nas minhas escolhas, por sempre acreditarem nos sonhos e que podemos torna-los realidade, pelo apoio quando tive que partir, por serem parte de mim e me fazer feliz.

Ao meu melhor amigo e marido Paulo Sergio, por sempre estar ao meu lado, não me deixar desistir, me apoiar todos os dias e sempre confiar em mim.

Aos meus amigos de batalha diária, Adriano, Carolina, Cristiano, Edson, Gustavo, José, Lucas A, Lucas B, Marcos, Oswaldo, Patrícia, Rafael, Rafaela, Ricardo, Sérgio Fernando, Wesley, por partilhar de momentos inesquecíveis.

Aos meus amigos que sempre me entenderam quando estava ocupada com os estudos, Ana Carolina, Ariane, Bruno, Fabiana, Foster, Heloisa, José Aparecido, Miguel, Paulo Victor, Wilson.

Aos professores Sergio Luiz Henke, Ana Sofia C. M. D'Oliveira, Rodrigo Perito, por me ajudarem quando precisei.

Aos laboratórios do LACTEC e ao André Ricardo Capra e André Chicowski, por me ajudarem em tudo que precisei, aos laboratórios da Universidade Federal do Paraná. LABATS (Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais) LAMATS, LABUSI, LORXI, por ajudarem a disponibilizar os equipamentos para todas as análises necessárias.

Ao PG-Mec e ao Marcio pelo apoio

A CAPES pelo apoio financeiro nos estudos.

EPÍGRAFE

Eu sei que ninguém sabe

De onde vem e para onde vai

Eu sei que é o pecado de todo mundo

É preciso perder para saber vencer

Sonhe

Sonhe até que seu sonho se realize

Aerosmith

RESUMO

A aspersão térmica é utilizada, para produzir revestimento, quando há a necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, podendo também, recuperá-las, em alguns casos. Para resistir em determinadas condições, como elevada temperatura, meio corrosivo e esforço mecânico é necessário o desenvolvimento de ligas específicas para suportar as mais diversas condições de serviço exigidas. Componentes que operam a altas temperaturas requerem que seus materiais apresentem resistência à oxidação adequada às condições de serviço. Compostos intermetálicos como as ligas NiAl apresentam excelente resistência a altas temperaturas e melhora da formação de uma camada protetora de alumina, além disso, possuem alto ponto de fusão, baixa densidade e alta dureza. Foram depositadas diferentes misturas de Ni e Al, pelo processo de aspersão térmica a chama pó, em substratos de aço inoxidável austenítico AISI 304. As influências do pré e pós-aquecimento foram avaliadas. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios microdureza Vickers e oxidação isotérmica. Os resultados obtidos através das análises feitas pelas técnicas de microscopia ótica, difração de raio-x, MEV e EDS, mostraram revestimentos de elevada aderência, baixa porosidade e estabilidade a elevada temperatura. Tornando a aspersão térmica à chama a pó uma alternativa na aplicação desse tipo de revestimentos.

Palavras-chaves: Intermetálicos Ni-Al. Aspersão Térmica. Chama a pó. Alta temperatura. Revestimento estável.

ABSTRACT

Thermal Spray is used to produce coatings, when it is necessary increasing the life of parts and systems and, in some cases, recover them. To resist certain conditions, such as high temperature, corrosive environment and mechanical stress, it is necessary to develop specific alloys to withstand the most different conditions of service required. Compounds that work at high temperature require materials that have resistance to oxidation, in according to their service conditions. Intermetallic compounds as NiAl alloys have excellent resistance at high temperature due the formation of a protective layer of alumina, moreover, they have high melting temperature, low density, and elevated hardness. They were deposited different mixtures of Ni and Al, by Powder Flame Spray process, in AISI 304 austenitic stainless steel substrates. The influence of pre and post-heating were analyzed. The specimens were submitted to Vickers microhardness and Isothermic oxidation tests. The results obtained from analyzes of optical microscopy, x-ray diffraction, SEM and EDS showed coatings with high adherence, low porosity and stability to high temperature. It shows powder Flame Spray process as an alternative in the application of these coatings.

Keywords: Intermetallic Ni-Al. Thermal Spray. Powder Flame Spray. High temperature. Stable Coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica (adaptada de PAREDES, 2009).....	18
Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica (SUCHARSKI, 2012) ..	19
Figura 3 - Imagem da seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente (adaptada de PADILHA, 2011)	20
Figura 4 - a) Desenho esquemático da pistola a chama a pó (adaptada de SULZER 2012); b) Imagem da pistola de AT a chama a pó (LABATS)	21
Figura 5 - Processos de AT HVOF. Esquema do tipo de pistola com câmara Venturi. (SULZER 2012).....	22
Figura 6 - Esquema da pistola e da formação do plasma (PAWLOWSKI, 2008)	23
Figura 7 - Esquema de aspersão pelo processo PTA (LIMA E TREVISAN, 2002). ..	24
Figura 8 - Diagrama NiAl (adaptado ASM HANDBOOK, 1992 e PADILHA, 2011) ...	25
Figura 9 - Corpos de prova com superfície jateada.....	31
Figura 10 - Cabine de jateamento	32
Figura 11 - Foto do equipamento de AT a chama pó - UFPR - LAMATS.....	33
Figura 12 - a)Dispositivo de colagem dos corpos de prova para ensaio de adesão; b) amostras montadas para ensaio de adesão.....	35
Figura 13 - Imagem do equipamento de ensaio de adesão	36
Figura 14 - Modos de falha do recobrimento no ensaio de adesão (LIMA, 2001)	36
Figura 15 - Desenho esquemático das identificações (TREVISANI, 2011)	37
Figura 16 - Foto do equipamento de microdureza Vickers.....	38
Figura 17 - Microscópio Ótico.....	38
Figura 18 - Forno utilizado para ensaio a alta temperatura	40
Figura 19 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga A Diamalloy.....	42
Figura 20 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga B 73%Ni27%Al	42
Figura 21 - Superfície da deposição de 73%Ni27%Al após ruptura por tração.....	43
Figura 22 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga C 87%Ni13%Al.	44
Figura 23 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga D 95%Ni5%Al.	44
Figura 24 - Superfície da deposição de 95%Ni5%Al após ruptura por tração.....	45
Figura 25 - Microestrutura do corte transversal da liga A Diamalloy	49
Figura 26 - Imagem em MEV (a) e EDS (b) da liga A Diamalloy.....	50
Figura 27 - a) Imagem MEV do revestimento Diamalloy e b) EDS.....	51
Figura 28 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura B – 73%Ni 27%Al.	52
Figura 29 - a) Imagem MEV do revestimento 73%Ni27%Al e b) EDS.	53
Figura 30 - a) Imagem MEV do revestimento 73%Ni27%Al e b) EDS.	54

Figura 31 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura C – 87%Ni 13%Al.	55
Figura 32 - a) Imagem MEV do revestimento 87%Ni13%Al e b) EDS.	56
Figura 33 - a) Imagem MEV do revestimento 87%Ni13%Al e b) EDS.	57
Figura 34 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura D – 95%Ni 5%Al.	58
Figura 35 - a) Imagem MEV do revestimento 95%Ni5%Al e b) EDS.	59
Figura 36 - a) Imagem MEV do revestimento 95%Ni5%Al e b) EDS.	60
Figura 37 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga A Diamalloy	61
Figura 38 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga B.....	62
Figura 39 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga C.....	62
Figura 40 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga D.....	63
Figura 41 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostra A1, a 750°C e 850°C.....	69
Figura 42 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostras A2, a 750°C e 850°C.	69
Figura 43 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostras A3, a 750°C e 850°C.	69
Figura 44 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga A.	70
Figura 45 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga A, ampliação da Figura 44.....	71
Figura 46 - a) Imagem do óxido de níquel b) EDS liga A.	72
Figura 47 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B1, 750°C e 850°C.	73
Figura 48 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B2, 750°C e 850°C.	73
Figura 49 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B3, 750°C e 850°C.	73
Figura 50 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga B, 73%Ni27Al....	74
Figura 51 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga B, ampliação da imagem 50.....	75
Figura 52 - a) Imagem dos óxidos de alumínio em MEV e b) EDS da liga B.	76
Figura 53 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C1, 750°C e 850°C.....	77
Figura 54 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C2, 750°C e 850°C.....	77
Figura 55 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C3, 750°C e 850°C.....	77
Figura 56 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga C, 87%Ni13%Ni.78	
Figura 57 - a) Imagem em MEV e b) EDS da liga C, ampliação da Figura 56.	79
Figura 58 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D1, 750°C e 850°C.....	80

Figura 59 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D2, 750°C e 850°C.....	80
Figura 60 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D3, 750°C e 850°C.....	80
Figura 61 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga D, 95%Ni5%Al.	81
Figura 62 - a) Imagem da partícula de níquel e b) EDS da liga D.	82
Figura 63 - a) Imagem do óxido de níquel e b) EDS da liga D.	83
Figura 64 - Difratograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A1.....	84
Figura 65 – Difratograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A2.....	84
Figura 66 - Difratograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A3.....	85
Figura 67 - Difratograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B1.....	85
Figura 68 - Difratograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B2.....	86
Figura 69 - Difratograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B3.....	86
Figura 70 - Difratograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C1	87
Figura 71 - Difratograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C2.	87
Figura 72 - Difratograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C3.	88
Figura 73 - Difratograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D1.	88
Figura 74 - Difratograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D2.	89
Figura 75 - Difratograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D3.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença nos processos de AT	24
Tabela 2 - Atribuições e temperatura máxima de uso para aluminetos de níquel	26
Tabela 3 - Composição das misturas	30
Tabela 4 - Parâmetros empregados no jateamento abrasivo das amostras.	32
Tabela 5 - Variáveis adotadas no processo de revestimento.	33
Tabela 6 - Identificação das amostras.....	34
Tabela 7 - Média das medidas de rugosidade.....	41
Tabela 8 - Médias do ensaio de aderência liga A Diamalloy	41
Tabela 9 - Médias do ensaio de aderência liga B 73%Ni27%Al	42
Tabela 10 - Médias do ensaio de aderência liga C 87%Ni13%Al.....	43
Tabela 11 - Médias do ensaio de aderência liga D 95%Ni5%Al.....	44
Tabela 12 - Média de % de poros	46
Tabela 13 - Média e desvio padrão do ensaio de Microdureza.	47
Tabela 14 - Quantificação dos elementos presentes na liga A.....	51
Tabela 15 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga Diamalloy, na Figura 27.	51
Tabela 16 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B, da Figura 29.	53
Tabela 17 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B, da Figura 30,	54
Tabela 18 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C, na Figura 32.	56
Tabela 19 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C, na Figura 33.	57
Tabela 20 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D.	59
Tabela 21 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, da Figura 36.	60
Tabela 22 - Média da % de poros após exposição a 750°C e 850°C.	64
Tabela 23 - Média e Desvio Padrão, da microdureza Vickers, das amostras após exposição a 750°C e 850°C	66
Tabela 24 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A na Figura 44.	70
Tabela 25 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A na Figura 44.	71
Tabela 26 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A Figura 46.	72
Tabela 27 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B da Figura 50.	74
Tabela 28 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B na Figura 51.	75

Tabela 29 - Quantificação dos elementos no revestimento produzido pela liga B da Figura 52	76
Tabela 30 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C.	78
Tabela 31 - Quantificação dos elementos presente no revestimento produzido pela liga C na Figura 57.	79
Tabela 32 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, na Figura 61.	81
Tabela 33 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D na Figura 62.	82
Tabela 34 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, na Figura 63.	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Medidas de porosidade (%).....	46
Gráfico 2 - Microdureza Vickers das amostras.....	48
Gráfico 3 - Porosidade 750°C.....	65
Gráfico 4 - Porosidade 850°C.....	65
Gráfico 5 - Microdureza 750°C	67
Gráfico 6 - Microdureza 850°C	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA (AT).....	18
2.1.1	Processo de aspersão térmica a chama oxiacetilênica (Flame Spray - FS).....	20
2.1.2	High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	21
2.1.3	Plasma Spray (APS)	22
2.1.3.1	<i>Plasma de Arco Transferido – PTA</i>	23
2.2	LIGAS DE Ni - Al	25
2.3	REVESTIMENTO DE NI-AL DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA...	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	COMPOSIÇÃO DO PÓ	30
3.2	SUBSTRATO.....	31
3.3	DEPOSIÇÃO	32
3.4	IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO	34
3.5.1	Rugosidade	34
3.5.2	Ensaio de Aderência	35
3.5.3	Medição da Porosidade	37
3.5.4	Microdureza.....	37
3.5.5	Microscopia Ótica (MO)	38
3.5.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	39
3.5.7	Difratometria de Raio X (DRX)	39
3.5.8	Estabilidade do revestimento.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	MEDIDAS DE RUGOSIDADE	41
4.2	ENSAIO DE ADERÊNCIA	41
4.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	45
4.3.1	Porosidade	45
4.3.2	Microdureza.....	47
4.3.3	Análise por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e EDS	49
4.3.3.1	<i>Microestrutura da deposição da liga A (Diamalloy) - 95%Ni 05%Al.....</i>	<i>49</i>

4.3.3.2	<i>Microestrutura da deposição da mistura B - 73%Ni 27%Al.....</i>	52
4.3.3.3	<i>Microestrutura da deposição da mistura C - 87%Ni 13%Al.....</i>	54
4.3.3.4	<i>Microestrutura da deposição da mistura D - 95%Ni 05%Al.....</i>	58
4.3.4	Análise da formação de fases observada via Difractometria de Raio X	60
4.4	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL APÓS EXPOSIÇÃO A 750°C E 850°C	63
4.4.1	Porosidade	63
4.4.2	Microdureza.....	66
4.4.3	Análise dos revestimentos em corte transversal via microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura + EDS.....	68
4.4.3.1	<i>Microestrutura da deposição da Liga A – Diamalloy 4008 NS 95%Ni 5%Al.....</i>	68
4.4.3.2	<i>Microestrutura da deposição da mistura B – 73%Ni 27%Al.....</i>	72
4.4.3.3	<i>Microestrutura da deposição da mistura C – 87%Ni 13%Al.....</i>	76
4.4.3.4	<i>Microestrutura da deposição da mistura D – 95%Ni 5%Al.....</i>	79
4.4.4	Análise da formação de fases observada via Difractometria de Raio X	83
5	COMENTÁRIOS GERAIS.....	90
6	CONCLUSÃO	91
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

Os compostos intermetálicos de NiAl são de grande interesse devido as suas propriedades de resistência mecânica, resistência a oxidação e corrosão em altas temperaturas (CARVALHO, 2007). O interesse em conhecer e desenvolver as propriedades dos componentes utilizados em altas temperaturas vem crescendo na mesma proporção que o interesse na melhoria do desempenho dos equipamentos, como no caso de motores, turbinas, etc., que operam em alta temperatura, exigindo assim materiais que suportem as diversas condições de serviço.

O diagrama de fases do níquel-alumínio mostra a possibilidade de formação de cinco compostos intermetálicos: NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl (fase com uma certa faixa de composição à baixas temperaturas), Ni_5Al_3 e Ni_3Al . Neste trabalho foram feitas misturas de Ni-Al com o intuito de formar dois compostos intermetálicos estáveis, o Ni_3Al e o NiAl, formados na extremidade rica em níquel, esses intermetálicos possuem resistência a oxidação, desgaste e corrosão a altas temperaturas, favorecem a formação de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, que é um óxido estável e o principal responsável pela proteção contra a oxidação nessas ligas (PENG e WANG, 2011).

Uma alternativa, para aumentar a resistência superficial dos materiais, é modificar a sua superfície através da aplicação de um revestimento constituído de materiais mais nobres, visando aumentar a sua durabilidade e resistência a um meio mais agressivo (SANTOS, 2008). Essas características podem ser alcançadas aplicando-se revestimentos de Ni-Al através da aspersão térmica, na qual se espera que durante o processo de deposição, possam se produzir compostos intermetálicos Ni-Al (BIRKS *et al.*, 2006). Um aspecto importante dos revestimentos aplicados por aspersão térmica, é a oxidação durante o processamento envolvido. A oxidação de materiais termicamente aspergidos pode influenciar significativamente na composição da fase, microestrutura, propriedades e, portanto, no desempenho dos revestimentos aspergidos termicamente (DESHPANDEA *et al.*, 2006).

A elevada vida útil dos revestimentos aplicados por aspersão térmica, a grande variedade de materiais que estão sendo desenvolvidos para serem usados nas mais diversas áreas de aplicação, a possibilidade de reparos de áreas danificadas e a utilização logo após sua aplicação têm contribuído para a utilização da aspersão térmica. As técnicas de aplicação do revestimento encontram-se em

grande avanço tecnológico, onde importantes propriedades como aderência, porosidade e teor de óxidos estão sendo otimizados (MENEZES, 2007).

Este trabalho visa produzir e estudar ligas *in situ* (processo de deposição) para o desenvolvimento de revestimentos de Ni-Al, com diferentes proporções e condições, através do processo chama a pó. Esses revestimentos devem ser estáveis a altas temperaturas e comparáveis aos processos HVOF e Plasma Spray (processos com custos relativamente mais caros), que são os processos mais utilizados nas indústrias, devido a resultados com menor porosidade e inclusão de óxidos (PAREDES, 2009).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA (AT)

A aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, é requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão, para elevar a resistência ao desgaste, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas. Para resistir a diversas condições de serviço é preciso que a engenharia dos materiais desenvolva ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço (PAREDES, 2009).

Segundo Marques (2003) os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros e a maioria dos plásticos. Revestimentos termicamente aspergidos têm sido usados intensivamente nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia, e particularmente aeroespacial. Na manutenção, milhões de dólares têm sido economizados com o uso da AT usada tanto em oficina como no campo, no revestimento de estruturas e partes de equipamentos, com economia de tempo e recursos.

De acordo com a literatura, o processo de AT (Figura 1), consiste na aplicação de um revestimento, metálico ou não-metálico, usando-se uma pistola de aspersão. Basicamente, o material sob a forma de pó ou arame é aquecido até o ponto de fusão e suas partículas são projetadas, por meio de ar comprimido ou gás inerte contra a superfície do substrato, aderem por impacto e resfriam, transformando-se no revestimento.

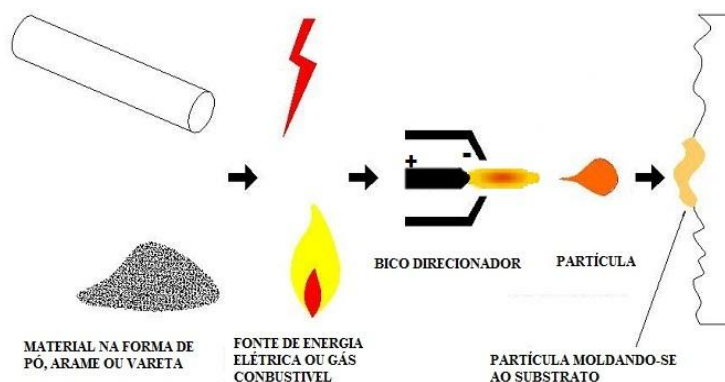


Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica (adaptada de PAREDES, 2009).

Na tecnologia de AT existem vários processos de deposição, todos diferentes e que utilizam diferentes fontes de calor assim como diferentes meios gasosos de transporte (NASCIMENTO, 2007). Na Figura 2 observa-se a classificação dos processos da AT.

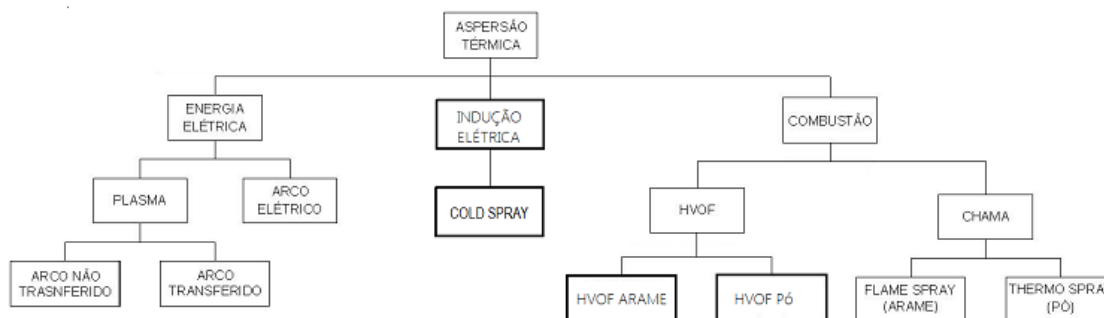


Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica (SUCHARSKI, 2012)

Os revestimentos aplicados pelo processo de AT, são formados por impacto sucessivo e interligação entre as panquecas. A rugosidade do substrato é uma característica muito importante para garantir o ancoramento das partículas durante o processo de deposição. Gera-se uma aderência e coesão entre o pó através da geração de tensões superficiais de contração, intertravamento de camadas, aumento da área de interação e descontaminação da superfície. O grau de enrugamento necessário para produzir um revestimento resistente e adequado depende do material aplicado, do processo e das condições de serviço da peça final (MARQUES 2003). A Figura 3 representa o revestimento aplicado através da AT. Observa-se um revestimento com lamelas (panquecas) moldadas à superfície rugosa do substrato contendo partículas fundidas e não fundidas, apenas deformadas, inclusão de óxidos, poros, e vazios. Nas panquecas existe um filme muito fino de óxido. Esta morfologia varia de processo para processo.

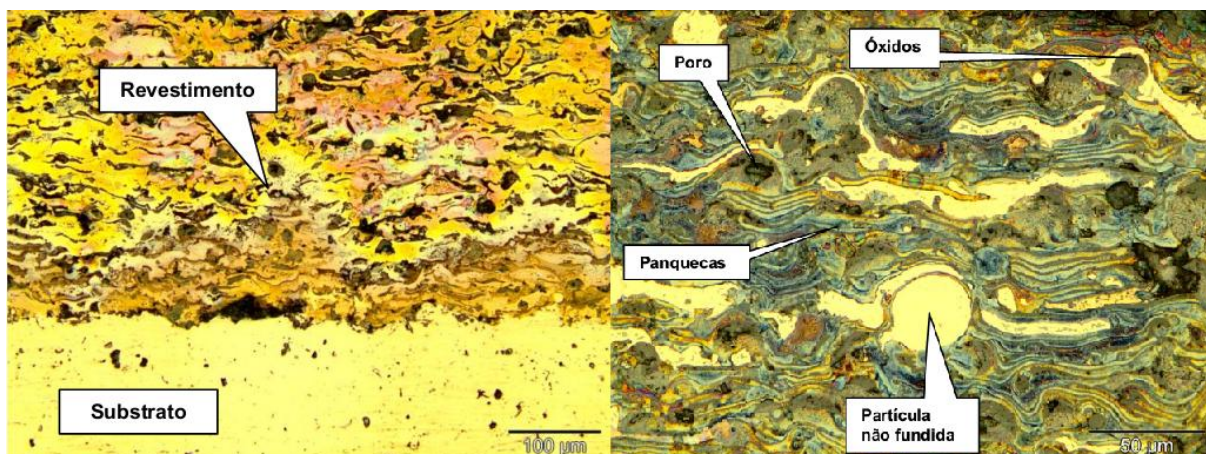


Figura 3 - Imagem da seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente (adaptada de PADILHA, 2011)

2.1.1 Processo de aspersão térmica a chama oxiacetilênica (Flame Spray - FS)

O processo de AT mais convencional e básico é por chama oxiacetilênica a pó, que tem as variantes de alimentação do pó por gravidade ou alimentado por um gás. Utiliza a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com oxigênio para fundir o material de deposição, enquanto um jato de gás inerte, (nitrogênio ou argônio), pulveriza o pó e acelera as partículas em direção ao substrato. No bico da pistola, Figura 4, a temperatura pode chegar a 3100°C, (Segundo Marques 2003, a combustão do acetileno com o oxigênio gera uma fonte de calor que pode atingir temperaturas da ordem de até 3100°C) enquanto que no substrato, durante o processo a temperatura não passa de 200°C (CORTÉS, 1998). Esse método de aspersão térmica produz, geralmente, revestimentos de menor resistência adesiva e coesiva e maior porosidade em geral, devido a menores velocidades alcançadas pelas partículas.

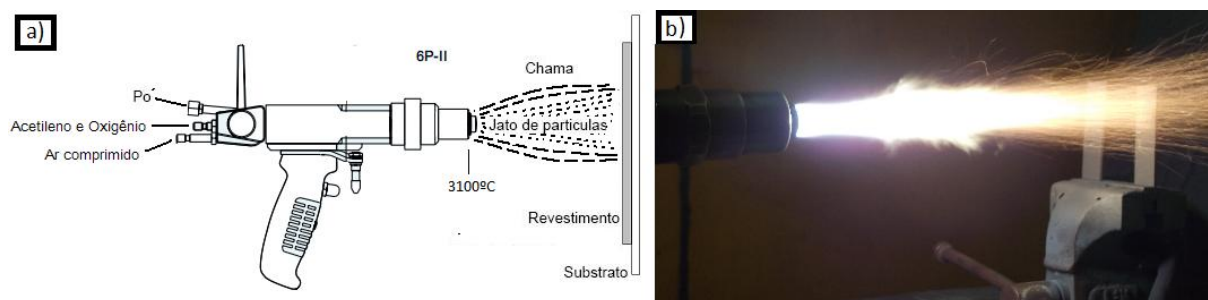


Figura 4 - a) Desenho esquemático da pistola a chama a pó (adaptada de SULZER 2012); b) Imagem da pistola de AT a chama a pó (LABATS)

2.1.2 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)

A Figura 5 apresenta esquematicamente o processo de AT HVOF, também conhecido como supersônico. A alimentação do pó no bocal é realizada de forma concêntrica ao bico da pistola. Utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico. O pó é atomizado ao passar por uma câmara quente tipo Venturi que além de aquecido tem a velocidade aumentada. Mas o pó não funde devido ao curto intervalo de tempo que estas partículas ficam na fonte de calor, as quais são apenas aquecidas, o que permite a elas um significativo aumento de sua energia cinética. E assim no momento do impacto contra o substrato as partículas transferem elevada energia (cinética + impacto + elevado calor) conforme (CORTÉS, 1998).

Como principais vantagens deste processo, podemos destacar:

- Elevada taxa de aderência;
- Baixa taxa de porosidade e oxidação; e
- Capacidade de aplicar materiais com densidade muito elevada.

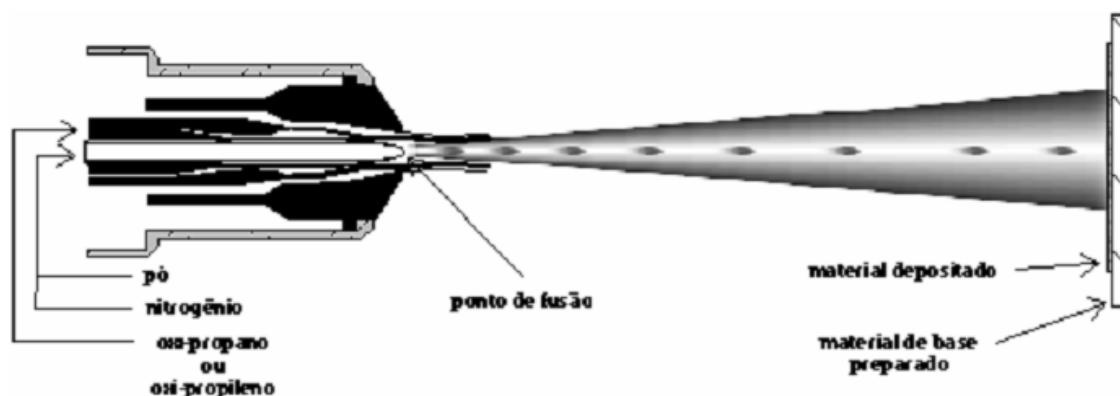


Figura 5 - Processos de AT HVOF. Esquema do tipo de pistola com câmara Venturi. (SULZER 2012).

2.1.3 Plasma Spray (APS)

Neste processo o plasma se cria mediante a um arco elétrico que se forma no bico da pistola e o gás do plasma se transforma em um jato de plasma ao sair deste bocal. Neste jato são injetadas partículas de pó que se fundem e atingem a peça de trabalho em alta velocidade, produzindo assim uma superfície com alto grau de aderência. Neste processo, podem ser aspergidos quase todos os materiais metálicos ou cerâmicos (COMERSUL, 2012).

Existem dois modos de formação de plasma: por arco transferido e por arco não transferido (Figura 6). No caso do arco transferido, o arco atinge a peça de trabalho que fecha o circuito elétrico. No arco não transferido, o arco é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o bocal. Desta forma o plasma é forçado através do orifício pelo gás e a peça não faz parte do circuito elétrico. O calor útil é obtido somente do jato de plasma, sendo conhecido como processo de aspersão térmica plasma spray. (PAREDES, 2009)

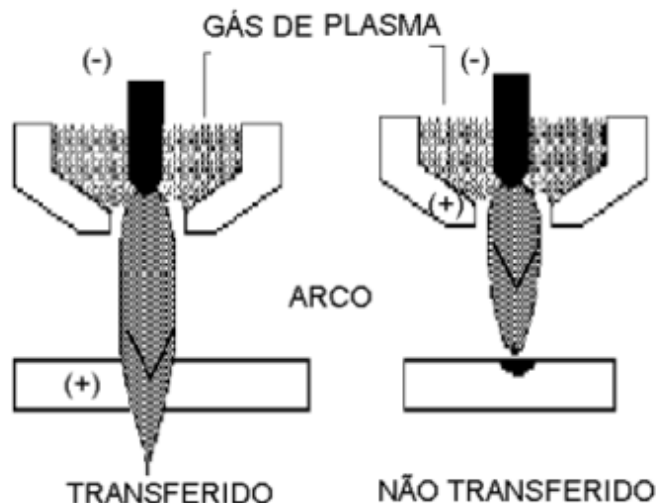


Figura 6 - Esquema da pistola e da formação do plasma (PAWLOWSKI, 2008)

2.1.3.1 Plasma de Arco Transferido – PTA

O processo PTA (Figura 7) permite a deposição de um grande espectro composicional de revestimentos metálicos e compósitos por trabalhar com consumíveis na forma de pó. PTA deposita revestimentos soldados de alta qualidade em taxas de deposição moderados com baixos custos de produção. (ALMEIDA, 2003). Nesta técnica, uma corrente secundária é estabelecida entre o eletrodo da pistola e o substrato que é condutor. A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material aspergido, geralmente na forma de pó, mistura-se com material da poça de fusão formada no substrato ocorrendo então uma diluição (PAREDES, 2009).

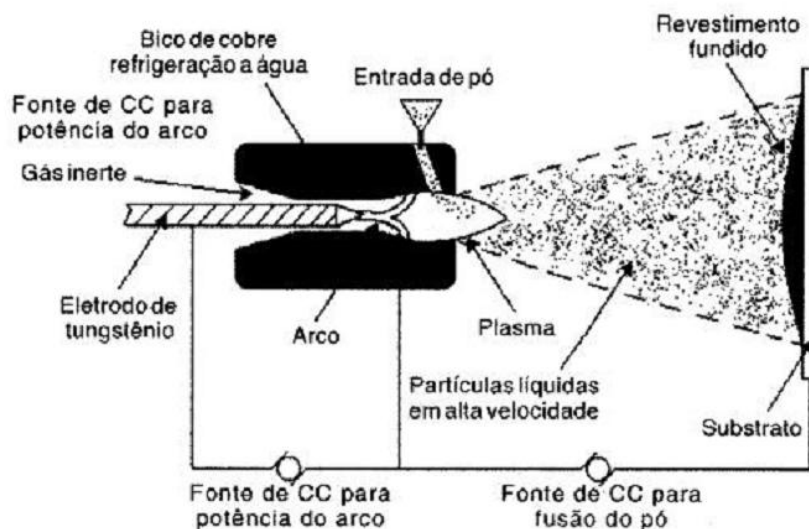


Figura 7 - Esquema de aspersão pelo processo PTA (LIMA E TREVISAN, 2002).

Para entender melhor a diferença entre os tipos de aspersão citadas nesse trabalho, a Tabela 1, mostra a comparação de características de processos de AT.

Tabela 1 - Diferença nos processos de AT

Característica	Processos		
	Chama (pó)	Plasma	HVOF
Vazão de Gases (m ³ /h)	11	4,2	28-57
Temperatura média (°C)	2200 - 3200	5500 - 14000	2700 - 3100
Atmosfera em torno da gotícula	CO, CO ₂ , H ₂ O	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O
Velocidade de impacto (m/s)	30 - 150	800	400 - 1200
Aderência relativa (MPa)	4 - 20	15 - 70	> 36
Coesão interlamelar	Baixa	Alta	Muito Alta
Teor de óxidos (%)	0,4 - 10	0,5 - 1	0,2 - 5
Teor de Poros (%)	5 - 15	1 - 7	< 3
Custo relativo (1 a 10)	3	5	5
Taxa de deposição máxima (kg/h)	7	5	14
Potência (kW)	25-75	30-80	100-270
Energia para Fusão (kW/kg)	11-22	12-22	22-200

Adaptada de THORPE, *et al.* 1993 e PAREDES 2009

2.2 LIGAS DE Ni - Al

O diagrama de fase do níquel-alumínio, apresentados na Figura 8, mostra compostos intermetálicos estáveis como, Ni_3Al e NiAl . A fase Ni_3Al tem uma estrutura cristalina L12, um derivado da estrutura cúbica de face centrada (CFC); NiAl possui uma estrutura B2, um derivado da estrutura de corpo centrado (CCC). Por causa das diferentes estruturas cristalinas, os dois aluminetos de níquel têm muitas propriedades físicas e mecânicas distintas (ASM HANDBOOK, 1992).

O Ni_3Al é um dos intermetálicos que exibem uma tensão de escoamento de engenharia que aumenta com o aumento da temperatura. Este comportamento faz o Ni_3Al mais resistente que muitas ligas de solução sólida em elevadas temperaturas e isto sugere que esses intermetálicos podem apresentar boas propriedades de resistência ao desgaste. Algumas de suas potenciais aplicações são em componentes de turbinas a gás, água e vapor, componentes da indústria aeroespacial que exijam resistência em altas temperaturas auxiliada a baixa densidade, pistões e válvulas, moldes permanentes e ferramentais (GONG *et al.*, 2011 e PADILHA, 2011).

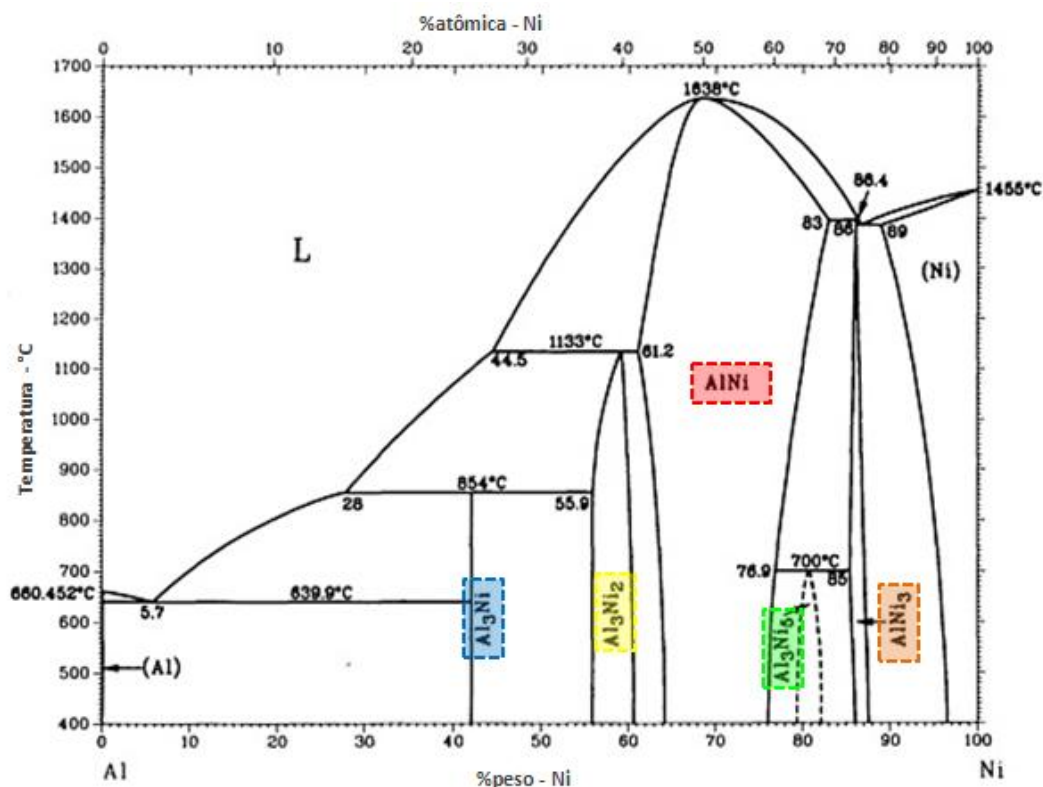


Figura 8 - Diagrama NiAl (adaptado ASM HANDBOOK, 1992 e PADILHA, 2011)

Estes intermetálicos possuem uma série de atributos que os tornam atraentes para aplicações de alta temperatura, Tabela 2. Eles contêm uma quantidade suficiente de alumínio para formar, em ambientes oxidantes, filmes finos de alumina (Al_2O_3) que é um óxido estável e protetor. Na transformação completa do $\text{NiAl} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Al}$, o revestimento a base de NiAl existe até o ponto em que o alumínio nesse composto é totalmente consumido na formação do óxido protetor. O equilíbrio entre as fases de um revestimento e uma superliga é o principal requisito a ser atendido quando se desenvolve revestimentos para palhetas de turbinas e aletas utilizadas em altas temperaturas (OKAMOTO, 2004 e PADILHA, 2011)

Segundo Ma *et al.* (2011), quando o óxido de níquel se junta ao óxido de alumínio eles formam o aluminato de níquel (NiAl_2O_4) que é um óxido protetor com uma estrutura CFC de átomos de oxigênio. Este óxido é muito conhecido por sua grande estabilidade térmica e por sua inércia química, por isso sua importância como material resistente à altas temperaturas (PHANI, 2001 e LEAL, 2008)

Tabela 2 - Atribuições e temperatura máxima de uso para aluminetos de níquel

Intermetálicos	Propriedade	Temperatura máxima de uso (°C)	
		Limite de resistência (MPa)	Limite de Corrosão
Ni_3Al	Resistência a oxidação, carburização e nitridação; resistência a altas temperaturas.	1100	1150
NiAl	Alto ponto de fusão; alta condutividade térmica; resistência a oxidação, carburização e nitridação	1200	1400

Fonte: DEEVI *et. al* 1997

Segundo Souza *et al.* (2006), ligas de NiAl, são resistentes à oxidação a altas temperaturas, possuem alto ponto de fusão, baixa densidade e elevada dureza. A película protetora e aderente é formada por $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Esta pode ser utilizada em revestimentos monocristalinos, tendo como principais vantagens a inexistência da difusão interna e de uma distorção térmica entre o revestimento e o substrato.

2.3 REVESTIMENTO DE NI-AL DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Revestimentos de Ni-Al vêm sendo aplicados por diversos procedimentos de AT. Para o intuito de comparação com este trabalho destacam-se alguns deles:

→ ALMEIDA, 2003, estudou a obtenção “*in situ*” de intermetálicos Ni-Al, pelo processo de AT plasma PTA, onde avaliou os efeitos da quantidade de alumínio adicionada à liga comercial de níquel (níquel-cromo-molibdênio), misturando o alumínio nas proporções 5, 12,4 e 23%. Estudou também a modificação de dois parâmetros de deposição (intensidade de corrente e velocidade de deposição) avaliando, em termos de alterações na formação de ligas “*in situ*”. Concluiu que é possível modificar “*in-situ*” ligas comerciais utilizando a técnica de deposição de Plasma PTA. Aumentando a quantidade de Al, resulta em um aumento de dureza e formação de novas fases. A difração de raios-X do revestimento com 23%Al apresenta picos de NiAl e intermetálico $Al_x(Fe, Ni, Cr, Mo)$. A variação dos parâmetros de processamento não teve influência na morfologia dos revestimentos processados com 5 e 12,4%Al. Para misturas com 23%Al ocorreu a formação de intermetálicos NiAl para todas as condições de processamento. A estabilidade dos revestimentos obtidos com variação dos parâmetros de processamento é melhor para a mistura com 23%Al, observando uma queda de dureza na temperatura de 1000°C, indicando uma estabilidade “precária” das fases formadas.

→ TREVISANI et. al., 2011, avaliou ligas de Ni Al utilizadas como revestimentos depositadas por aspersão térmica a chama pó, com diferentes misturas e condições de deposição. Concluiu que as análises das fases presentes observadas no DRX da liga comercial Diamalloy (95%Ni e 5%Al) mostraram a formação dos intermetálicos Ni_3Al , NiAl e NiO, devido a transformação do 95%Ni5%Al durante o processo de deposição (chama, transporte e substrato).

O tempo de exposição à temperatura da chama (200°C), durante a deposição, não foi suficiente para a formação de $\alpha-Al_2O_3$, em nenhuma das ligas, mas pequenos picos de NiO foram encontradas em todas as amostras. Nas misturas de Ni Al, através da análise por difratometria de raio-x foram encontrados pico de Al, Ni e NiO, não havendo a formação de intermetálicos. Isso se deve a dois possíveis fatores, a temperatura de 200°C, de pré e pós aquecimento, e a temperatura e o tempo de

exposição do pó durante o processo de deposição (chama, transporte e substrato), não foram suficientes para formação de intermetálicos. Os maiores valores de dureza foram encontrados para os revestimentos depositados com a liga comercial Diamalloy, nos quais houve a formação de intermetálicos NiAl. As microscopias ópticas mostraram que os revestimentos que sofreram tratamento térmico de pré e pós aquecimento, apresentaram lamelas mais finas e uma estrutura mais homogênea.

A liga comercial Diamalloy apresentou maior oxidação após sofrer tratamento térmico. Embora os resultados de tração tenham obtidos valores menores para tensão do que as aspergidas via HVOF ou plasma, os valores são muito altos para um revestimento depositado pelo processo FS. Os revestimentos obtiveram elevada aderência, baixa porosidade e poucas inclusões de óxidos nas misturas de Ni e Al, o que torna que o processo chama a pó um meio viável e econômico para a aplicação dessas ligas de Ni e Al, normalmente depositadas por outros processos.

→ DESHPANDE, et. al., 2005, estudou os mecanismos de oxidação de revestimentos de Ni-Al através da deposição por aspersão térmica e seu papel na evolução microestrutural. A liga Diamalloy 4008 NS (95%Ni%Al) foi depositada pelos processos de HVOF e Plasma, e feito um estudo da formação de óxidos durante o processo de deposição. Concluiu que a oxidação ocorre durante a aspersão, bem como após o impacto, a morfologia das panquecas e o impacto, durante o processo, gera a divergência microestrutural nestes revestimentos. A oxidação durante o voo das partículas, para o substrato, cria uma concha de óxidos sobre a partícula, fazendo com que quando ela atinge o substrato, resulte em uma panqueca com blocos de óxidos distribuídos, gerando faixas de óxidos que separam as mesmas. A presença ou ausência de óxidos, pré depositados, na superfície de topo, determina o ângulo da molhabilidade, das partículas que irão ser impactadas, e consequentemente na interface e na coalescência das panquecas. Esse último impacto afeta as propriedades e desempenho do revestimento.

→ PADILHA, 2011, estudou o desenvolvimento “*in situ*” de intermetálicos Ni-Al em superfícies de aço inoxidável AISI 304 através da aplicação por aspersão térmica a chama a pó com mistura de pós de níquel e alumínio. Foram depositadas misturas de Ni e Al com diferentes condições e concluiu-se que as análises DRX efetuadas

evidenciaram a formação de compostos intermetálicos do tipo NiAl e Ni₃Al para todas as amostras analisadas. A formação dos intermetálicos ainda ocorre de maneira descontínua e não homogênea. As mesmas análises ainda mostraram a formação de óxidos de níquel e um óxido composto, que tendem a funcionar como reforço mecânico à liga, além de serem benéficos para aplicações onde a prevenção à corrosão seja um requisito. A formação de óxidos é favorecida pela aplicação do pré e do pós-aquecimento a 400 °C.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos do trabalho, foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

- Composição do Pó;
- Substrato;
- Decomposição;
- Identificação das amostras;
- Caracterização;

3.1 COMPOSIÇÃO DO PÓ

Observando o diagrama na Figura 8 (Página 26), foram escolhidas duas composições de misturas para a tentativa de formar NiAl e Ni₃Al, que são os intermetálicos de interesse neste trabalho. Para comparação com ligas utilizadas na indústria, foi escolhida a liga Diamalloy 4008 (Sulzer, 2012), com 95%Ni5%Al e para comparar com a composição da liga comercial foi preparada uma mistura da mesma composição. Todas as misturas e a liga comercial apresentou granulometria na faixa de -45µm +80 µm.

Os pós das misturas têm 98% de pureza e foram peneirados no peneirador automático marca VIBROTECH CT-025 para chegar à granulometria desejada. Os mesmos foram secos em estufa até 120°C, e em seguida misturados em um misturador metálico tipo Y rotacionado em um torno mecânico a 50 rpm, por 2 horas. Depois colocados na estufa por pelo menos 24h, para ficarem completamente secos para deposição. A Tabela 3 mostra a composição das misturas escolhidas.

Tabela 3 - Composição das misturas

Identificação	Composição	
A Diamalloy 4008	95%Ni	5%Al
B	73%Ni	27%Al
C	87%Ni	13%Al
D	95%Ni	5%Al

3.2 SUBSTRATO

Foram utilizadas chapas de aço inoxidável AISI 304, cortadas nas dimensões 73x19x3mm (Figura 9), para os ensaios de microdureza Vickers e oxidação a alta temperatura e também para as análises de microscopia ótica, difração de raio-x, MEV e EDS. Para o ensaio de aderência foram utilizados corpos de prova cilíndricos, de aço carbono 1020, com dimensão de $\varnothing 25\text{mm}$ e 25mm de altura. Os substratos sofreram o processo recomendado para obtenção da rugosidade superficial necessários à aderência do revestimento e limpeza através do jateamento de abrasivo que garantiu a limpeza grau Sa3, norma NACE RMN – 01/70.



Figura 9 - Corpos de prova com superfície jateada

Para o jateamento foi utilizada a cabine da marca CMV modelo 65 9075, mostrada na Figura 10, e a Tabela 4, mostram os parâmetros usados.



Figura 10 - Cabine de jateamento

O ar comprimido impulsiona o impacto de um fluxo de material abrasivo, sob alta pressão, na superfície do substrato.

Tabela 4 - Parâmetros empregados no jateamento abrasivo das amostras.

Parâmetro	Valores utilizados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco #36 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Gás de transporte do abrasivo	Ar comprimido
Pressão de jateamento	80 à 100 psi
Distância de jateamento	100 mm
Ângulo	90°

3.3 DEPOSIÇÃO

As deposições foram realizadas no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPR.

Foi utilizada a cabine de aspersão com sistema de exaustão e retirada do pó via parede com lâmina de água; bancada de aspersão fabricante Sulzer modelo

5MPE com pistola 6PII e alimentador RP5, funil por onde passa o pó com alimentação constante, mostrados na Figura 11. Os gases utilizados no processo de aspersão foram oxigênio, acetileno, nitrogênio.

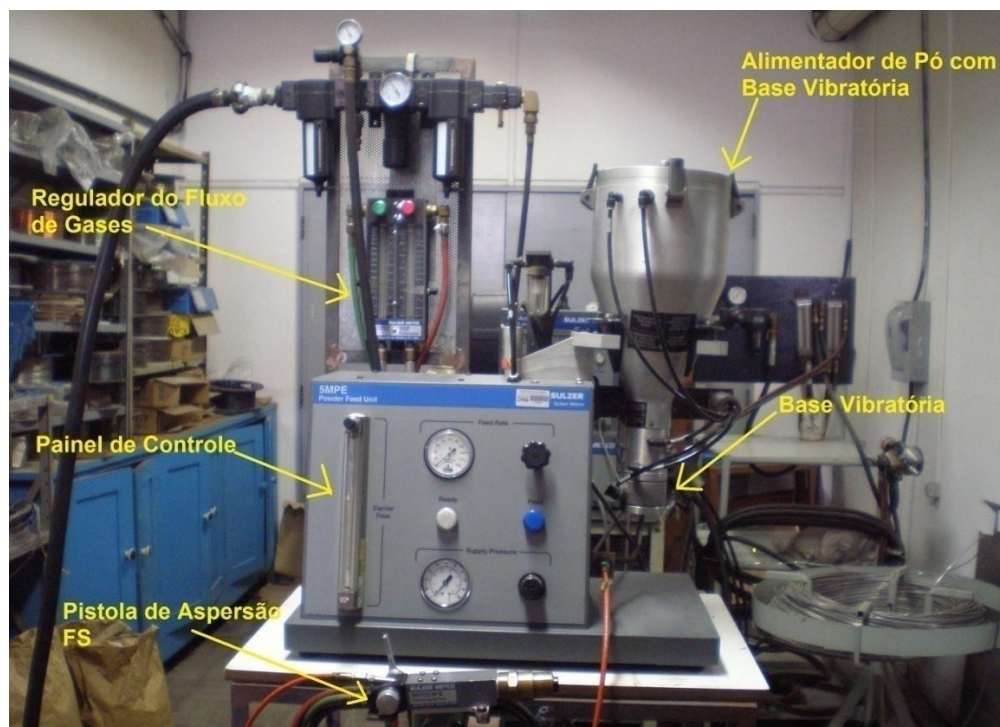


Figura 11 - Foto do equipamento de AT a chama pó - UFPR - LAMATS

Antes da deposição dos corpos de provas estudados, foram feitos teste preliminares para determinação dos valores adequados dos parâmetros de aspersão, variando os valores de fluxo dos gases e números de camadas, até a obtenção do revestimento esperado. Os valores ideais encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis adotadas no processo de revestimento.

Parâmetro	Valores Utilizados
Distância do substrato – tocha	250 mm
Número de camadas	15
Fluxo de Nitrogênio	0,28 m ³ /h
Fluxo de Oxigênio	2,26 m ³ /h
Fluxo de Acetileno	1,13 m ³ /h
Pressão do Nitrogênio	344,75 kPa (50 psi)
Pressão do Oxigênio	344,75 kPa (50 psi)
Pressão do Acetileno	117,21 kPa (17 psi)

3.4 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram depositados 3 corpos de prova para cada liga e condição, totalizando 36 corpos de prova de aço inoxidável AISI 304 na forma de chapas e 36 corpos de prova de aço carbono 1020 na forma cilíndrica.

Para deposição dos revestimentos e posteriores análises necessárias, os corpos de prova foram identificados segundo a liga e condições de deposição conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Identificação das amostras

Ligas	Condições		
	Substrato na Temperatura Ambiente	Substrato com Pré-Aquecimento (400°C)	Substrato com Pré e Pós Aquecimento (400°C) por 3 min.
Diamalloy 4008NS – 95%Ni5%Al	A1	A2	A3
73%Ni 27%Al	B1	B2	B3
83%Ni 17%Al	C1	C2	C3
95%Ni 5%Al	D1	D2	D3

O Aquecimento dos corpos de prova foi feito pela chama da própria pistola sem a alimentação do pó, utilizando um pirômetro para medição da temperatura do substrato.

3.5 CARACTERIZAÇÃO

Depois de aspergido, cada corpo de prova foi cortado em 6 partes iguais utilizando discos de corte lisos na cortadora metalográfica. Dessas 6 partes, 3 foram embutidas com baquelite vermelha na prensa embutidora automática, e todas foram lixadas em politriz automática, com lixas com granulometria de 100 a 1200. Depois polidas pano de polimento para uso com pasta de diamante.

3.5.1 Rugosidade

As medidas de rugosidade superficial foram feitas pelo rugosímetro da marca MITUTOYO SJ-201, seguindo as normas para medição. Esse equipamento é capaz de fornecer as medidas em Ra: desvio médio aritmético; Rz: altura das

irregularidades em dez pontos; R_y : altura máxima das irregularidades; R_{Sm} : espaçamento médio das irregularidades nas medições horizontais.

3.5.2 Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência é um ensaio quantitativo que mede a resistência do revestimento através da tração de corpos de prova cilíndricos. Para a união dos mesmos foi utilizado um dispositivo conforme a Figura 12 e um adesivo epóxi Araldite Profissional. Os corpos de prova aspergidos foram colados em corpos de prova jateados, com óxido de alumínio branco, seguindo as normas ASTM C-633 79 (Lima e Guilemany, 2007). O ensaio foi realizado no equipamento da marca Instron, modelo 4467 (LACTEC) (Figura 13).

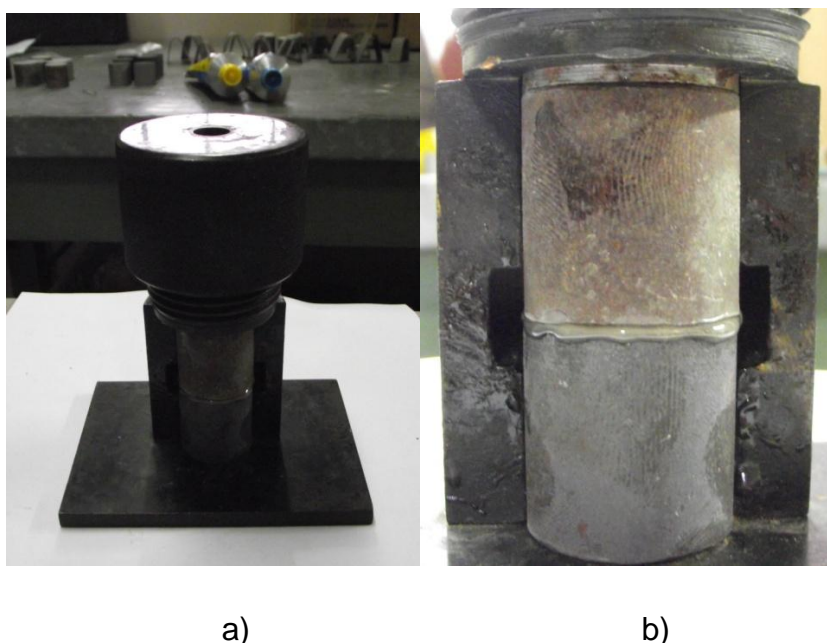


Figura 12 - a) Dispositivo de colagem dos corpos de prova para ensaio de adesão; b) amostras montadas para ensaio de adesão



Figura 13 - Imagem do equipamento de ensaio de adesão

Após o ensaio de aderência foi preciso examinar os corpos de prova para identificar qual o tipo de falha que ocorreu. A Figura 14 mostra os modos de falha que podem ocorrer durante o ensaio de aderência

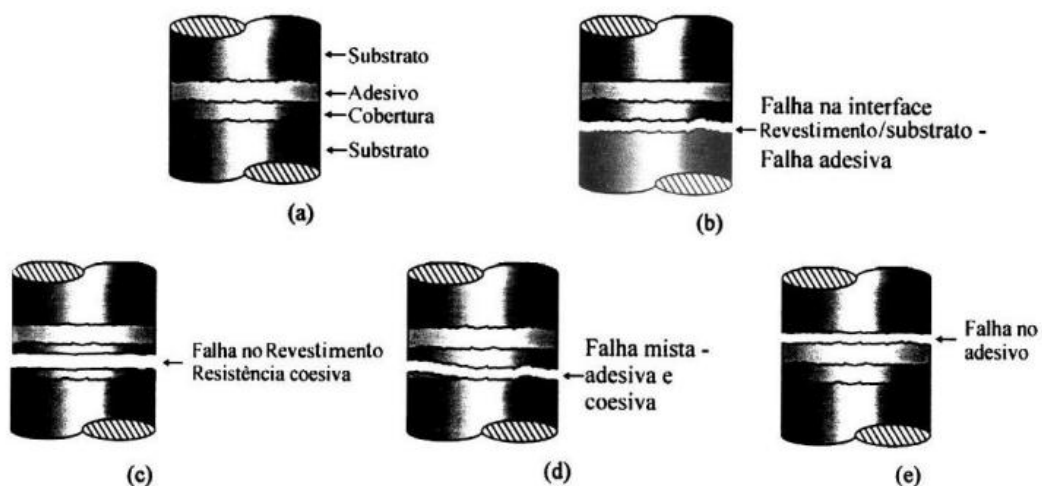


Figura 14 - Modos de falha do recobrimento no ensaio de adesão (LIMA, 2001)

3.5.3 Medição da Porosidade

Os revestimentos obtidos por aspersão térmica apresentam porosidade variável e este fenômeno pode afetar a condutividade elétrica, a condutividade térmica, a coesão entre as camadas e a aderência ao substrato. Para quantificar a porosidade do revestimento, foi utilizado o software Analysis 5.1, instalado junto ao software do microscópio ótico Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR. Através da imagem capturada pelo microscópio, determina-se uma área onde, por variação de cores, é determinada a porcentagem de poros. Foram efetuadas medições de 5 áreas para cada amostra e tomada a média dos resultados.

3.5.4 Microdureza

A dureza Vickers baseia-se na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga. Os corpos de prova foram embutidos na máquina Arotec Pré-30, com baquelite marrom, em seguida lixados e polidos. Foram feitas 5 identações, sem espaçamento pré definido mas tomando cuidado de fazer as marcações em fases diferentes, verificada pela diferença na coloração, conforme Figura 15, em cada corpo de prova. A carga aplicada foi de 300g por 15 segundos, o equipamento utilizado foi o HMV Shimadzu, Figura 16.

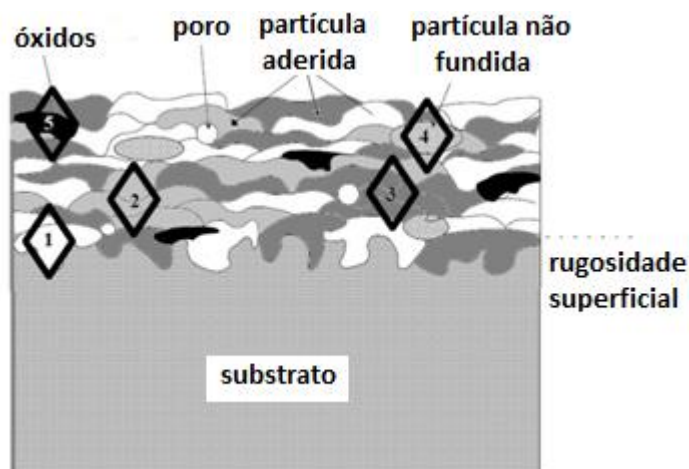


Figura 15 - Desenho esquemático das identações (TREVISANI, 2011)



Figura 16 - Foto do equipamento de microdureza Vickers

3.5.5 Microscopia Ótica (MO)

As imagens para análise foram capturadas através do microscópio ótico Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR, Figura 17.

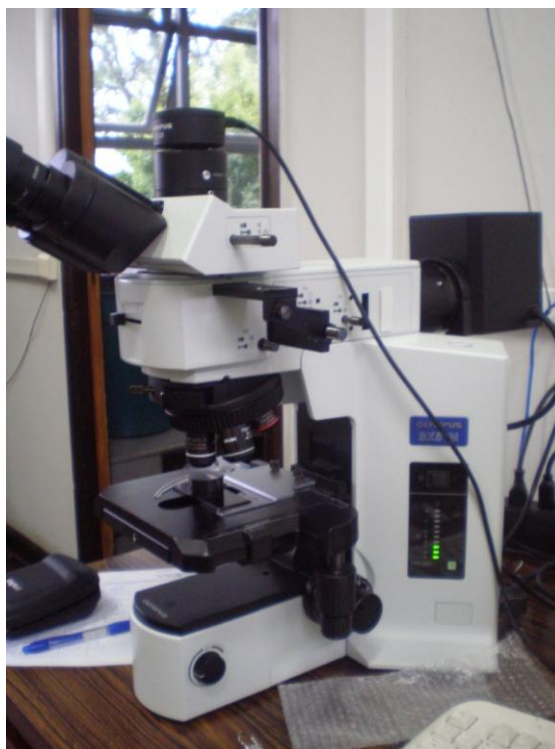


Figura 17 - Microscópio Ótico

Através desse equipamento é possível capturar imagens de 200x a 1000x de ampliação, fazer medição de espessura do revestimento e quantifica poros.

3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através do MEV, há um estudo da microestrutura, possibilitando a obtenção de imagens com alta resolução do revestimento e sua análise química através do EDS acoplado. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura modelo XL30 da marca Philips. A análise da composição química, semi-quantitativa, foi realizada por micro-análise de energia dispersiva (EDS) utilizando detector de energia dispersiva de raios X marca EDAX, acoplados ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), ambos os equipamentos instalados nos laboratórios de materiais do LACTEC. Após a obtenção do resultado da micro-análise foi possível realizar o mapeamento dos elementos encontrados em cada amostra.

3.5.7 Difratometria de Raio X (DRX)

Para o DRX, o equipamento utilizado foi o da Shimadzu D7000, com varredura de 0° a 90° , com escala de 2θ e velocidade de $1^{\circ}/\text{min}$, que encontra-se no laboratório de Física da UFPR.

A análise por DRX identifica os compostos cristalinos presentes nos corpos de provas (buscando por compostos presumidamente na amostra), comparando-os com um banco de dados contendo informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas de compostos cristalinos.

3.5.8 Estabilidade do revestimento

Este ensaio teve como objetivo comprovar a estabilidade, a alta temperatura, das misturas e da liga utilizada pelo processo de AT a chama a pó. Os corpos de prova foram colocados dentro de cadinhos, cerâmicos próprios para o forno. O equipamento (Figura 18), pertence ao LACTEC e está instalado no Laboratório de Aspersão Térmica da UFPR, ele permite trabalhar com temperaturas de até 1200°C (atmosfera não controlada), tanto em regime isotérmico como em regimes de

oxidação cíclica. Um forno tubular que tem a ele acoplado um sistema de deslocamento para a entrada e saída das amostras. Foram feitos ensaios a 750°C e 850°C, por 3 horas para cada temperatura, mantendo os corpos de prova ao ambiente. Depois foram feitas imagens no microscópio ótico, MEV e EDS, ensaio de microdureza Vickers, comparando com os resultados das peças que não sofreram a exposição.

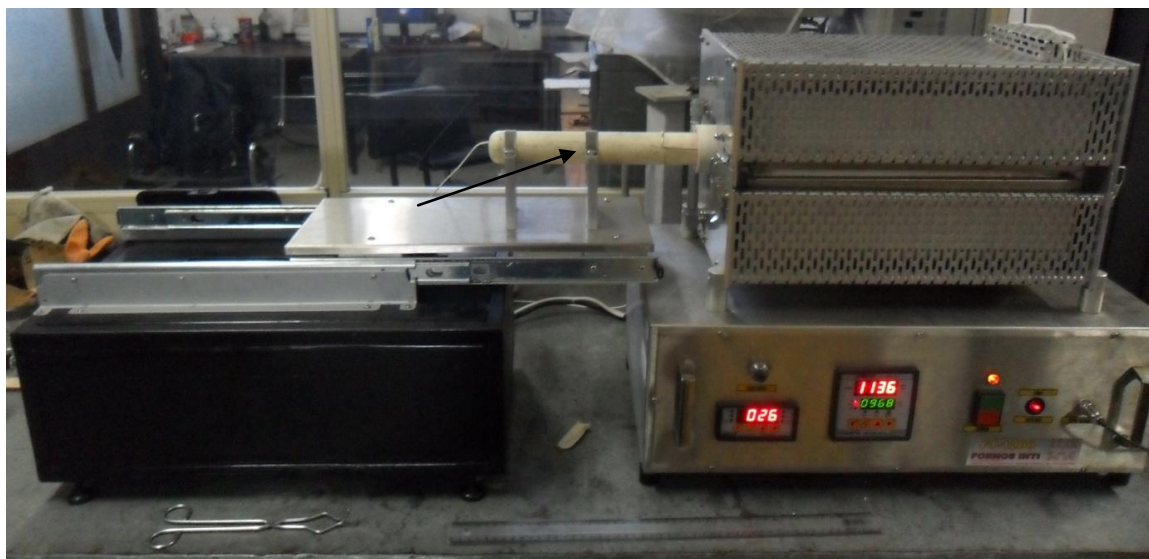


Figura 18 - Forno utilizado para ensaio a alta temperatura

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões estão apresentados em 2 partes. Na primeira, mostrando os resultados das deposições, e comparando-os com a diferença de resultados de aspersão com pré e pós-aquecimento, a diferença da liga comercial para as ligas misturadas e a diferença microestrutural entre elas. Na segunda parte, há uma comparação entre as amostras depois da exposição a 750°C e 850°C.

4.1 MEDIDAS DE RUGOSIDADE

Foram feitas 5 medidas de rugosidade nas amostras, em forma de chapa, logo depois de jateadas. A Tabela 7 mostra a média delas.

Tabela 7 - Média das medidas de rugosidade

Substrato	Ra(μm)	Ry(μm)/Rz(μm)	Rq(μm)	RSm(μm)
AISI 304	6,04	35,66	7,57	94,4

As médias de rugosidade são comparáveis com a literatura (TERRES 2006), que obteve rugosidade Ra entre 4,99 e 8,59 μm , utilizando abrasivo de óxido de alumínio branco com #30 mesh.

4.2 ENSAIO DE ADERÊNCIA

As Tabelas de 8 a 11 apresentam as médias dos valores de tensão de ruptura e a respectiva aderência para cada corpo de prova testado. As Figuras 19 a 23 mostram os corpos de prova após o ensaio de aderência.

Tabela 8 - Médias do ensaio de aderência liga A Diamalloy

Amostras	Força [kN]	Tensão [MPa]	Rompimento
A1	4,1	8,0	entre as lamelas e a interface
A2	6,5	12,9	entre as lamelas
A3	9,5	18,7	entre as lamelas

Nota-se um aumento na tensão de ruptura, para com as amostras que sofreram pré e pós-aquecimento de 400°C, durante a deposição em relação à amostras sem tratamento térmico



Figura 19 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga A Diamalloy

O modo de falha da amostra A1 foi mista, quando há uma ruptura adesiva e coesiva. As amostras A2 e A3 tiveram falha no revestimento, havendo uma resistência coesiva.

Tabela 9 - Médias do ensaio de aderência liga B 73%Ni27%Al

Amostras	Força [kN]	Tensão [MPa]	Rompimento
B1	5,9	11,5	entre as lamelas
B2	9,8	19,3	entre as lamelas e a interface
B3	11,0	21,8	entre as lamelas e a interface

Nota-se, como nas amostras da liga A, um aumento na tensão de ruptura, quando comparado à amostra sem tratamento térmico com as que sofreram pré e pós-aquecimento de 400°C, durante a deposição. Porém as tensões de ruptura da liga B são maiores que as da liga A.



Figura 20 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga B 73%Ni27%Al

O modo de falha na amostra B1 foi falha no revestimento, mostrando uma resistência coesiva. Nas amostras B2 e B3, houve falha mista, adesiva e coesiva.

Através da Figura 21, observa-se exatamente onde ocorreu a falha mista.

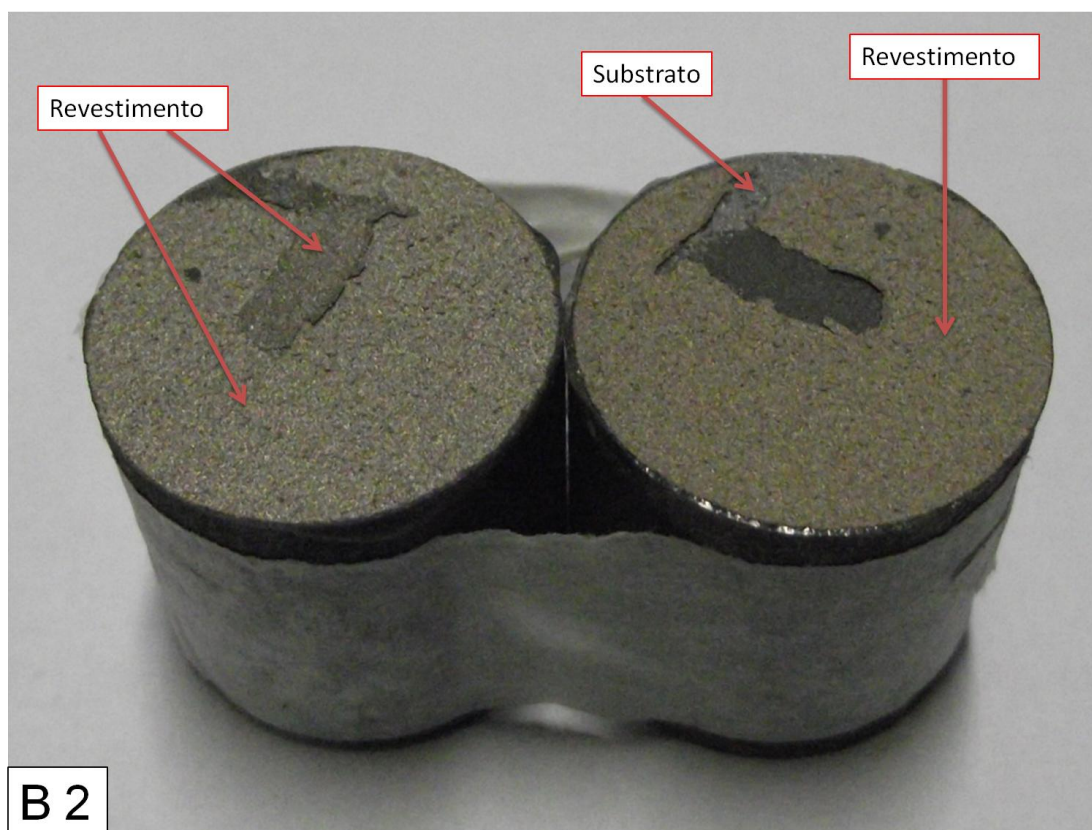


Figura 21 - Superfície da deposição de 73%Ni27%Al após ruptura por tração

Tabela 10 - Médias do ensaio de aderência liga C 87%Ni13%Al

Amostras	Força [kN]	Tensão [MPa]	Rompimento
C1	4,9	9,6	entre as lamelas
C2	9,6	18,9	entre as lamelas
C3	10,7	21,2	entre as lamelas e a interface

Na liga C também ocorreu um aumento na tensão de ruptura, quando comparado à amostra sem tratamento térmico com as que sofreram pré e pós-aquecimento de 400°C, durante a deposição. Obteve-se um resultado melhor que o da liga A, porém um pouco menor que a liga B.



Figura 22 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga C 87%Ni13%Al.

Nas amostras C1 e C2 ocorreram falha no revestimento, tendo assim, uma resistência coesiva. Na amostra C3 houve uma falha mista, adesiva e coesiva.

Tabela 11 - Médias do ensaio de aderência liga D 95%Ni5%Al

Amostras	Força [kN]	Tensão [MPa]	Rompimento
D1	4,9	9,7	entre as lamelas
D2	9,1	18,2	entre as lamelas
D3	8,7	17,3	entre as lamelas e a interface

Na liga D ocorreu um aumento na tensão de ruptura, quando comparado à amostra sem tratamento térmico.



Figura 23 - Superfície dos corpos de prova após ensaio de aderência da liga D 95%Ni5%Al.

As amostras D1 e D2 tiveram falha no revestimento, tendo assim, uma resistência coesiva. A amostra D3 teve uma falha mista, adesiva e coesiva.

A Figura 24 mostra detalhadamente a falha mista.

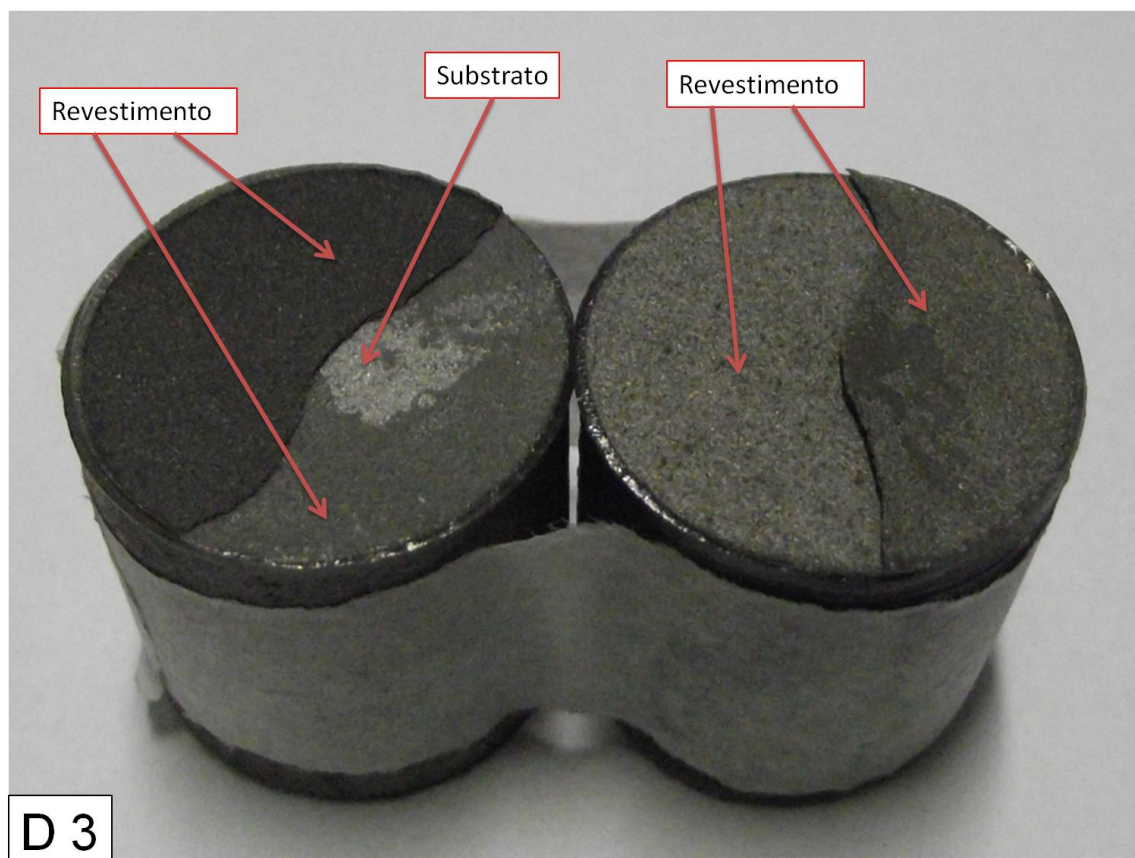


Figura 24 - Superfície da deposição de 95%Ni5%Al após ruptura por tração

Observa-se que nas ligas A, B e C, as amostras que sofreram pré e pós-aquecimento, obtiveram os melhores resultados no ensaio de aderência, seguidas das amostras com pré-aquecimento. A liga com o melhor resultado foi à liga B, 73%Ni27%Al seguida das ligas C e D, respectivamente. A liga A, Diamalloy, foi a que obteve o pior resultado após o ensaio de aderência.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

4.3.1 Porosidade

A Tabela 12 mostra os resultados da porcentagem de poros dos corpos de prova depois de aspergidos.

Tabela 12 - Média de % de poros

Amostra	Porosidade %	Desvio Padrão
A1	2,18	0,84
A2	2,86	0,56
A3	3,06	0,65
B1	2,48	0,88
B2	2,83	0,35
B3	2,54	0,82
C1	2,24	0,35
C2	2,49	0,24
C3	2,78	0,21
D1	2,49	0,80
D2	2,15	0,95
D3	2,74	0,26

O Gráfico 1 mostra todos os valores de porosidade (%) obtidos nas medidas de áreas da seção transversal de cada corpo de prova

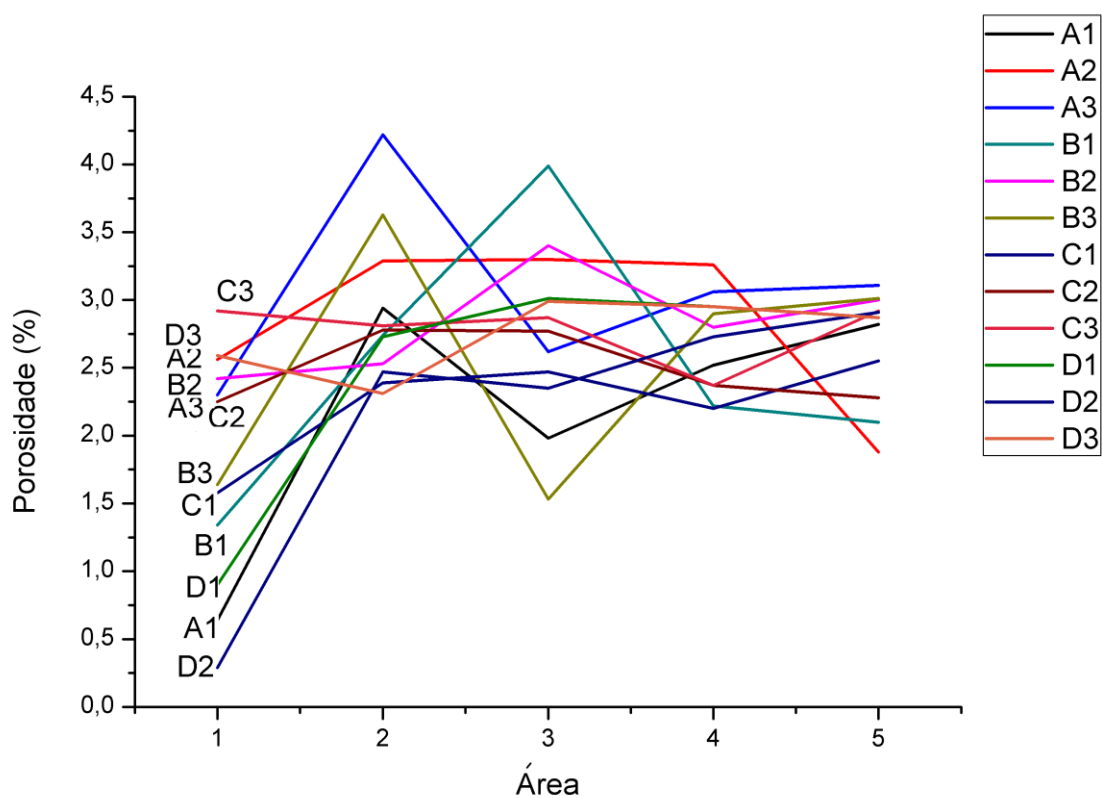


Gráfico 1 - Medidas de porosidade (%)

Nota-se que os valores obtidos pela deposição por chama a pó, são inferiores, aos encontrados na literatura, podendo ser comparados aos processos de Plasma Spray e HVOF (Tabela 1, página 24). Pôde-se obter esses resultados, pois os parâmetros de processo estavam completamente regulados, fazendo com que na deposição houvesse fluxo de pó constante, proporcionando revestimentos com poucos poros.

4.3.2 Microdureza

Foram feitas 5 medidas de dureza, na secção transversal do revestimento, para isso as amostras, depois de aspergidas, foram cortada e embutidas em baquelite marrom. A média das mesmas e o desvio padrão encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Média e desvio padrão do ensaio de Microdureza.

Amostra	Média (HV_{0,3})	Desvio Padrão
A1	211,4	75,43
A2	273,2	67,94
A3	313,6	98,82
B1	176,2	41,68
B2	202,2	67,96
B3	229,8	21,68
C1	168,2	32,38
C2	162,2	14,55
C3	166,4	22,09
D1	129,2	8,43
D2	134	19,84
D3	164,4	21,87

O Gráfico 2 mostra os valores de microdureza obtidos para todas as amostras.

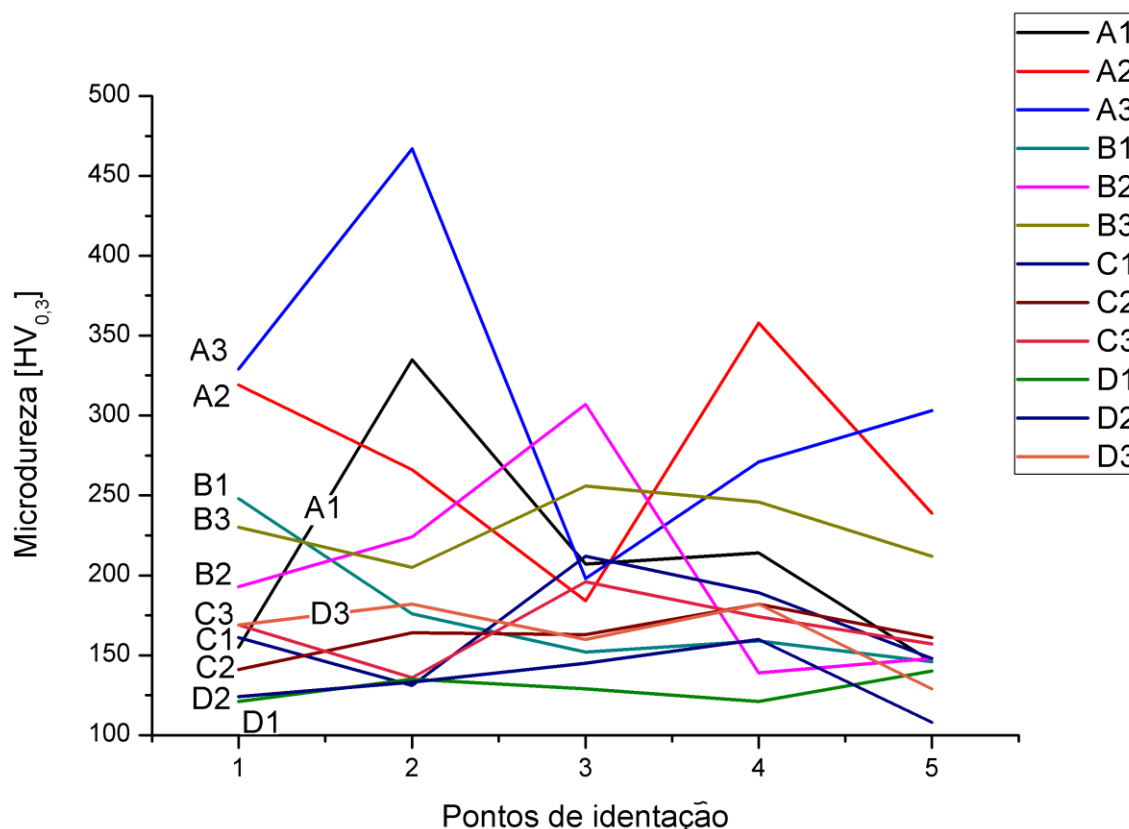


Gráfico 2 - Microdureza Vickers das amostras

As amostras que sofreram tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimentos têm valores de microdureza maiores que as amostras com somente pré-aquecimento, que tem valores maiores que as amostras sem o tratamento térmico. As amostras da Liga A, obtiveram maiores valores de microdureza, acredita-se que é pelo fato de ser uma liga atomizada de NiAl, onde há maior formação de intermetálicos no processo. A Liga B, comparada com as outras ligas misturadas, foi a que teve maior valor de microdureza. Esses valores são bons, quando comparados a aplicações pela técnica de aspersão térmica a plasma PTA (ALMEIDA 2003), pois indicam a formação de revestimentos com boa resistência mecânica.

O revestimento criado pela aspersão térmica a chama a pó, cria várias fases presente no mesmo. Os valores altos de desvio padrão se devem ao fato das identações não serem somente em uma fase formada e sim escolhidos em pontos aleatórios para a aplicação da carga (Figura 15, página 37).

4.3.3 Análise por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e EDS

A imagens a seguir mostram as imagens e análises feitas pelos processos de MO, MEV e EDS

4.3.3.1 Microestrutura da deposição da liga A (Diamalloy) - 95%Ni 05%Al

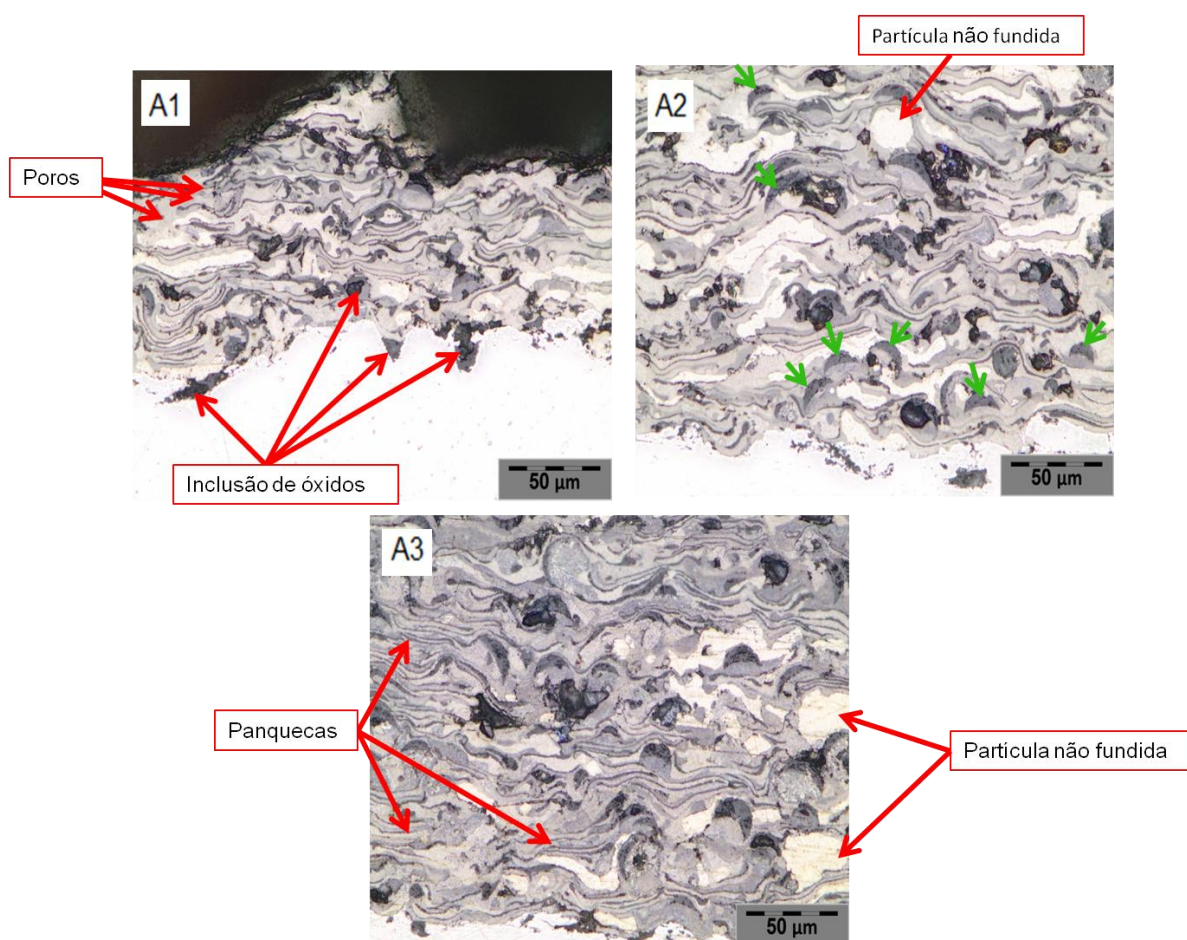


Figura 25 - Microestrutura do corte transversal da liga A Diamalloy

Na Figura 25, percebe-se que a amostra A1 tem um revestimento mais fino que na amostra A2 e A3. Esse fato é devido a uma irregularidade na alimentação do pó, durante a deposição, porém, em todas as amostras observa-se um revestimento denso, homogêneo, com panquecas bem definidas, poucos poros e pouca inclusão de óxidos. As setas verdes indicam presença de NiO. Este óxido, nesse trabalho, sempre está com o formato de “meia lua”.

Nota-se que nas amostras que sofreram tratamento térmico, houve um aumento na quantidade de óxidos. A amostra A3 é a que possui maior formação desses óxidos, formação de intermetálicos e a que possui maior homogeneidade e coalescimento das panquecas.

Os contornos das panquecas, com coloração cinza escuro, são óxidos de alumínio.

A Figura 26 mostra claramente os óxidos de níquel, em formato de “meia lua” e os óxidos de alumínio, nos contornos das panquecas. Através do EDS, observam-se quais elementos estão presentes na área selecionada (Figura 26), porém o mesmo não identificou os óxidos formados, pois a quantidade dos mesmos, em relação à área selecionada, é bem pequena e de pequena espessura.

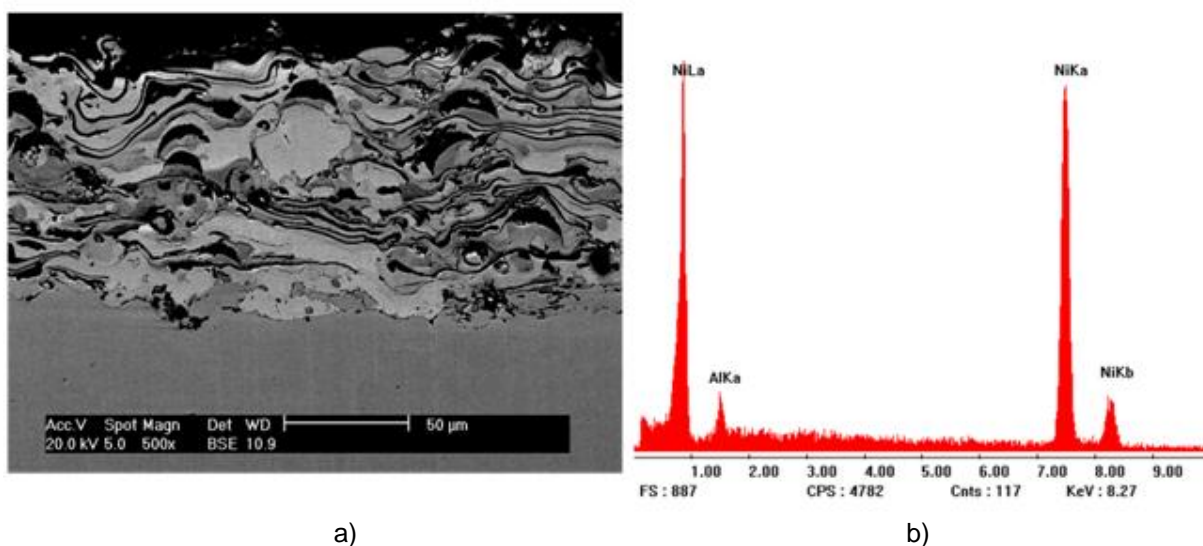


Figura 26 - Imagem em MEV (a) e EDS (b) da liga A Diamalloy

O EDS permite quantificar a porcentagem dos elementos presentes na área medida. Observa-se na Tabela 14, que a Liga A manteve a proporção de Ni-Al da liga como produzida pelo processo de atomização.

Tabela 14 - Quantificação dos elementos presentes na liga A.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	4,4	9,1
Ni	95,59	90,89

Na Figura 27, destaca-se a presença de óxidos, com a aproximação da área analisada. O EDS e a quantificação dos elementos presentes (Tabela 15) deixa claro a formação de óxidos de níquel, indicados pelas setas azuis.

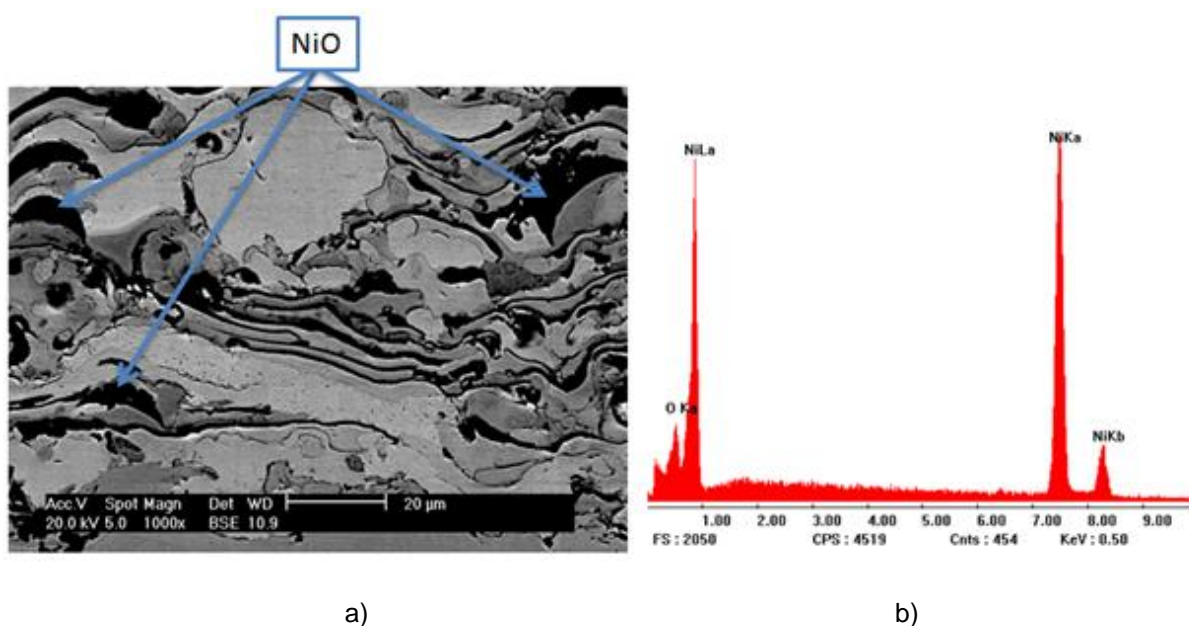


Figura 27 - a) Imagem MEV do revestimento Diamalloy e b) EDS

Tabela 15 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga Diamalloy, na Figura 27.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	6,42	20,12
Ni	93,57	79,87

A Liga A, apresentou menor espessura de revestimento, porém foi a que obteve uma grande formação de intermetálicos, pois é uma liga atomizada de NiAl. Também foi a que obteve o melhor resultado no ensaio de microdureza.

Comparando as amostras A1, A2 e A3, em todos os ensaios e análises microestruturais, a amostra A3, com pré e pós-aquecimento, foi a que obteve os melhores resultados, seguida da amostra A2.

4.3.3.2 Microestrutura da deposição da mistura B - 73%Ni 27%Al

Na Figura 28, observa-se o coalescimento das partículas de Ni, que é a parte mais clara na imagem. É um revestimento homogêneo, com pouca inclusão de óxidos e poros visíveis. A coloração cinza, mais claro, são partículas de Al, e os contornos de grão são óxidos de alumínio.

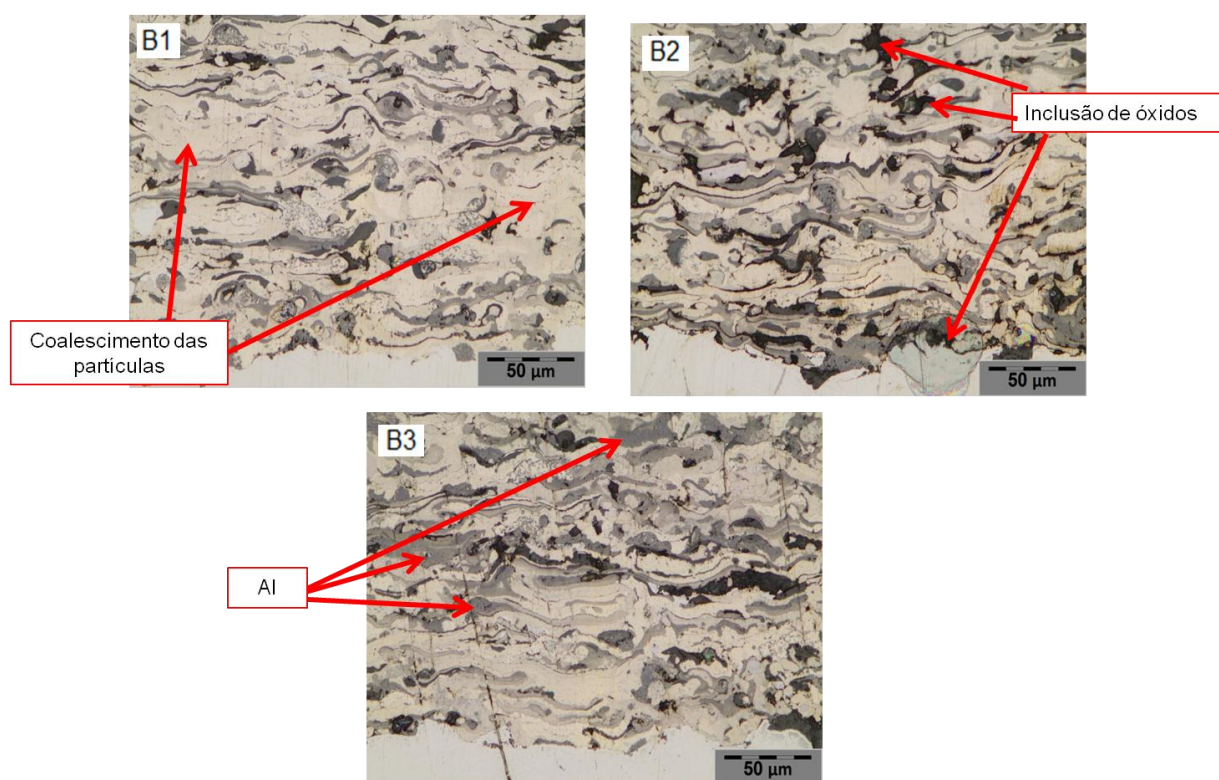


Figura 28 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura B – 73%Ni 27%Al.

Através da imagem capturada pelo MEV (Figura 29), observa-se pelo EDS, e pela Tabela 16, a maior concentração de Ni, e uma diminuição do Al puro, pois a liga não manteve a proporção da deposição, 73% Ni e 27% Al, na área analisada. Notam-se vários contornos nas lamelas, identificados como óxidos de alumínio.

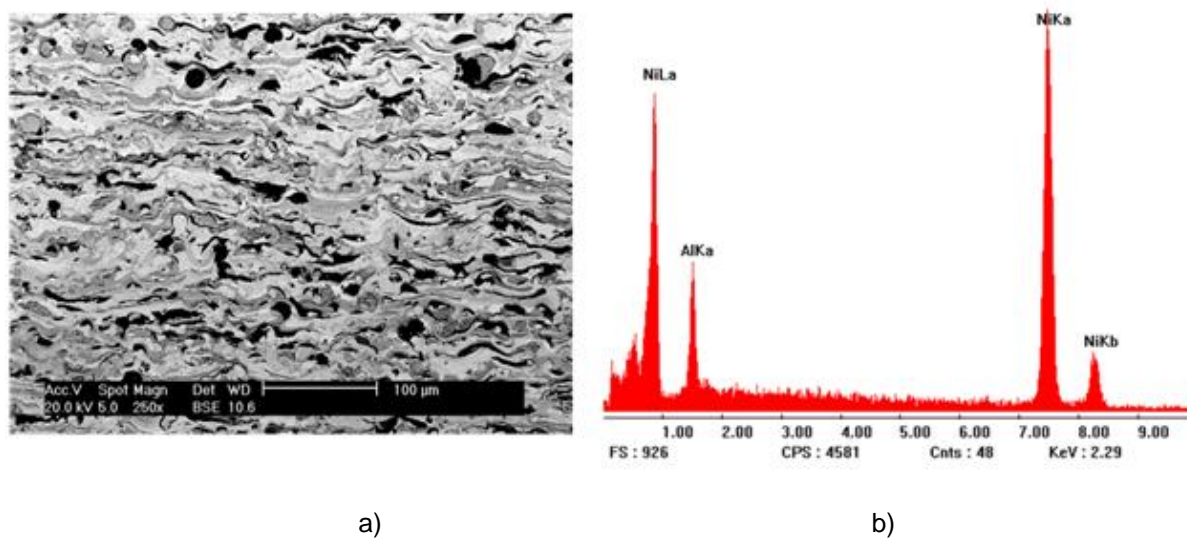


Figura 29 - a) Imagem MEV do revestimento 73%Ni27%Al e b) EDS.

Tabela 16 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B, da Figura 29.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	10,97	21,14
Ni	89,02	78,85

Com a ampliação da imagem anterior (Figura 30), observa-se a presença do intermetálico NiAl e uma maior presença de Ni. Nesse trabalho os intermetálicos NiAl, sempre tem a mesma aparência. A Tabela 17 mostra que nessa área a mistura também não manteve a proporção.

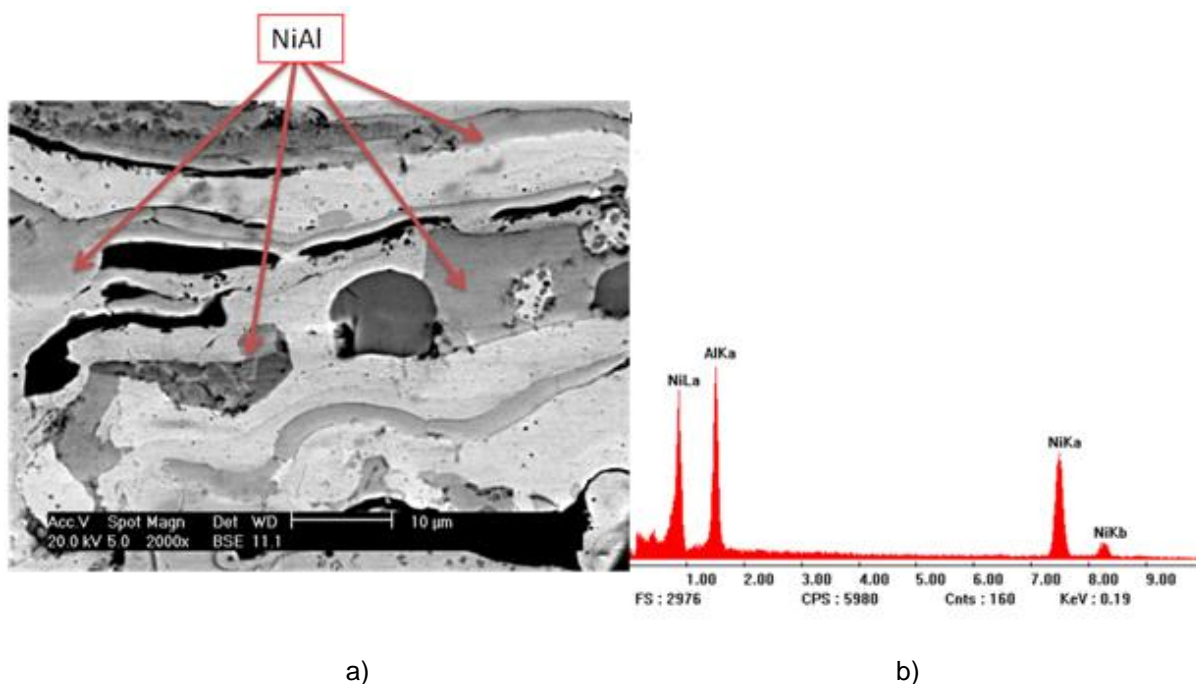


Figura 30 - a) Imagem MEV do revestimento 73%Ni27%Al e b) EDS.

Tabela 17 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B, da Figura 30,

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	33,86	52,69
Ni	66,13	47,3

A Liga B, foi a que obteve melhor resultado no ensaio de aderência, e com maior média no ensaio de microdureza, quando comparada com as outras ligas misturadas, C e D.

Comparando B1, B2 e B3, a amostra B3 foi a que obteve o melhor resultado nos ensaios e nas caracterizações microestruturais, seguida da amostra B2.

4.3.3.3 Microestrutura da deposição da mistura C - 87%Ni 13%Al

Na Figura 31, nota-se uma maior presença de Ni, a parte mais clara da imagem. Há uma maior inclusão de óxidos na amostra C3, que sofreu pré o pós-aquecimento. É um revestimento homogêneo, com pouca inclusão de óxidos e poros visíveis.

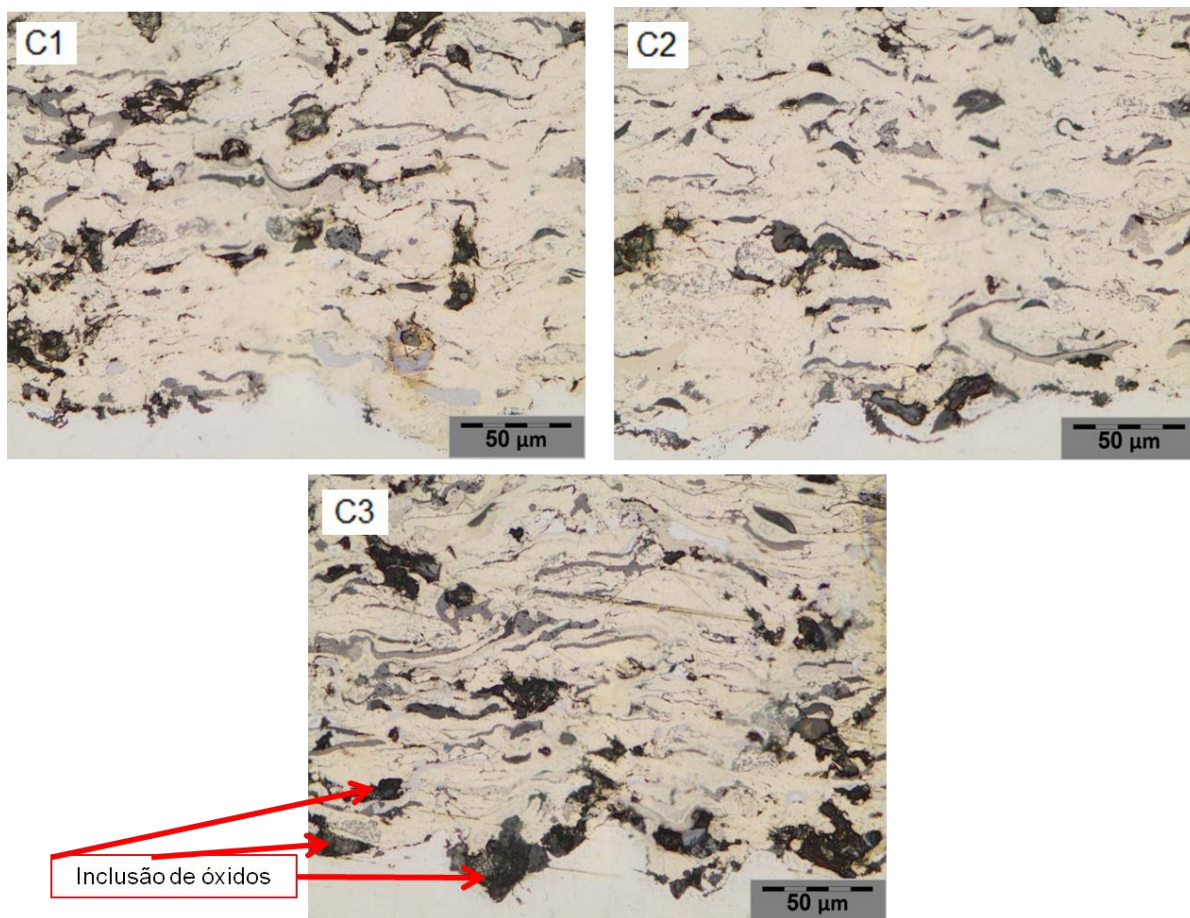


Figura 31 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura C – 87%Ni 13%Al.

Através da imagem do MEV (Figura 32), observa-se um revestimento com panquecas coalescidas, com poucos óxidos de níquel. A Tabela 18 mostra que na área observada não se manteve a proporção da deposição.

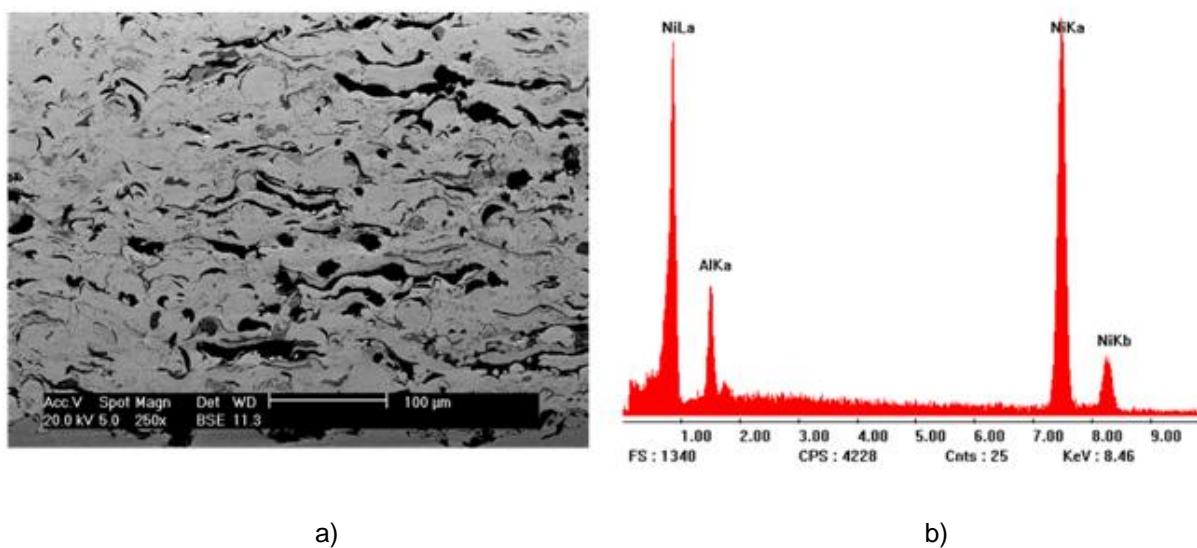


Figura 32 - a) Imagem MEV do revestimento 87%Ni13%Al e b) EDS.

Tabela 18 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C, na Figura 32.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	9,93	19,36
Ni	90,06	80,63

Na Figura 33, as setas indicam o intermetálico NiAl, com uma coloração de cinza, mais escuro. A formação desses intermetálicos foi em pequena quantidade, e nessa área, também não se manteve a proporção de Ni-Al depositados (Tabela 19).

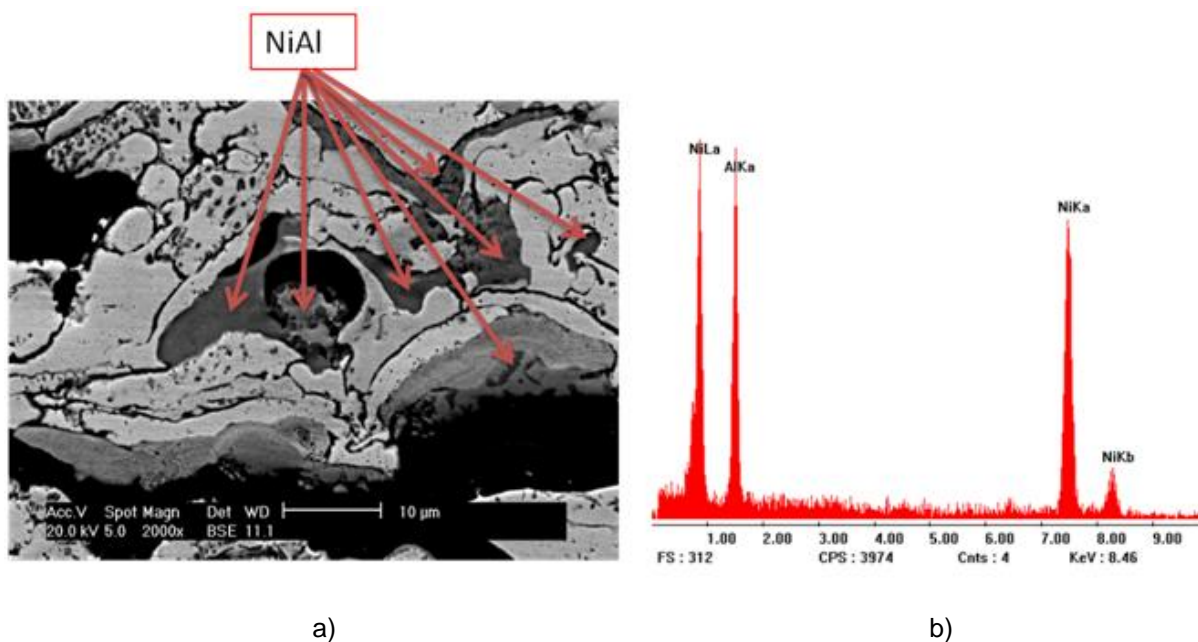


Figura 33 - a) Imagem MEV do revestimento 87%Ni13%Al e b) EDS.

Tabela 19 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C, na Figura 33.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	27,49	45,2
Ni	72,2	54,79

As amostras da Liga C, no ensaio de aderência, tiveram resultados um pouco abaixo que a Liga B, porém maiores que a Liga A. Em relação ao ensaio de microdureza, a Liga C, comparada com as Ligas A e B, foi a com menor média de microdureza.

Comparando as amostras C1, C2 e C3, nos ensaios de aderência e microdureza, a amostra C3 foi a que obteve melhor resultado, seguida da amostra C2.

4.3.3.4 Microestrutura da deposição da mistura D - 95%Ni 05%Al

Na Figura 34, observa-se um revestimento com panquecas, de níquel, coalescidas, e pouco alumínio, isso se deve ao fato dessa mistura ter somente 5% do mesmo.

A amostra D3 é a que possui maior inclusão de óxidos, por ser a amostra que sofreu tratamento térmico de pré e pós-aquecimento.

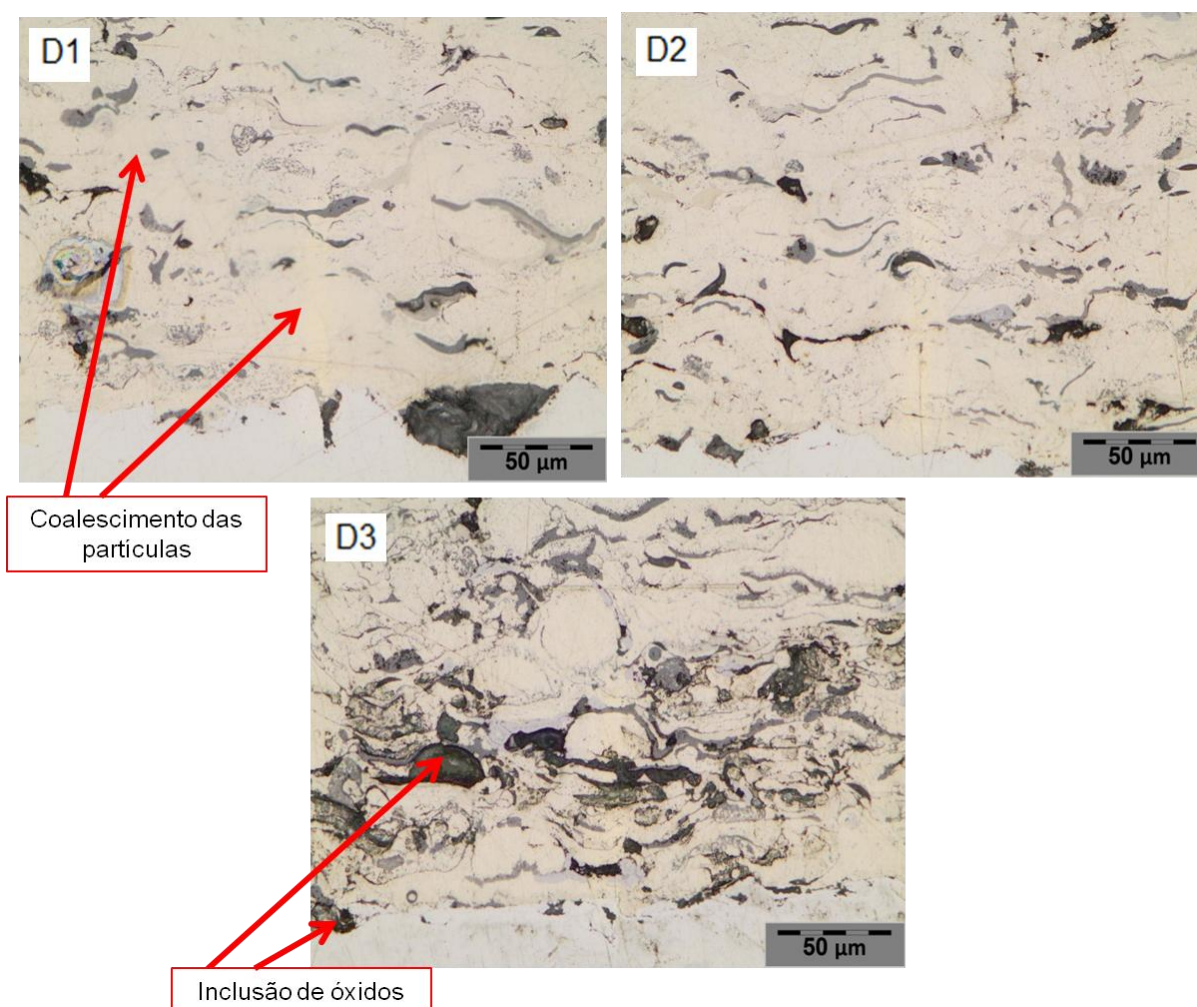


Figura 34 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela mistura D – 95%Ni 5%Al.

Na Figura 35, notam-se alguns contornos das panquecas, óxidos de alumínio, que não são identificados pelo EDS da área medida. Através da Tabela 20, percebe-se que a mistura ocorreu uma pequena diminuição na proporção de deposição.

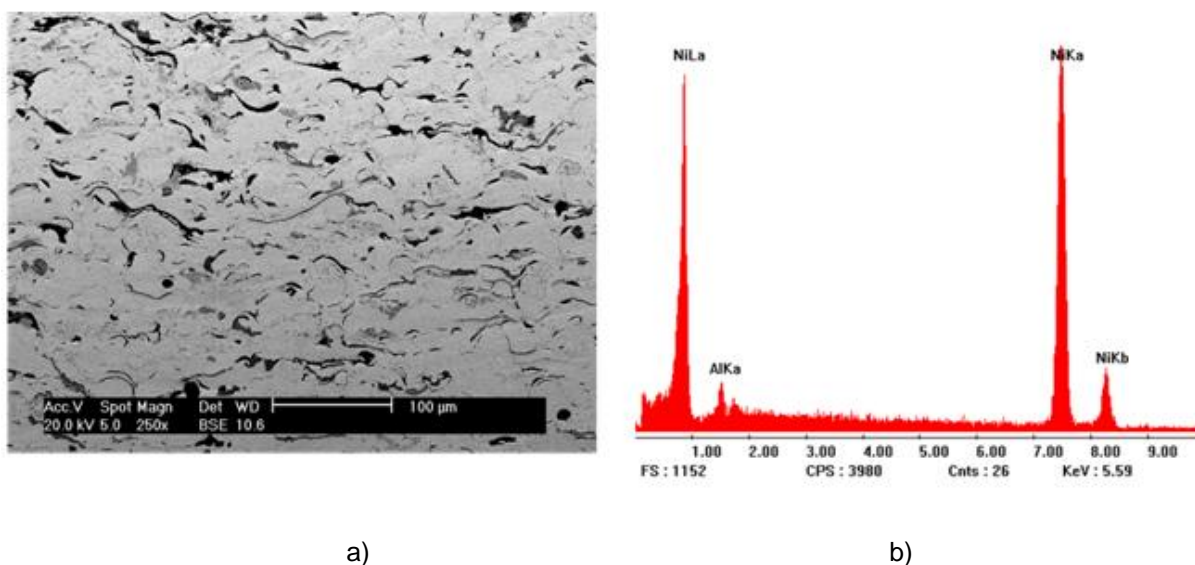
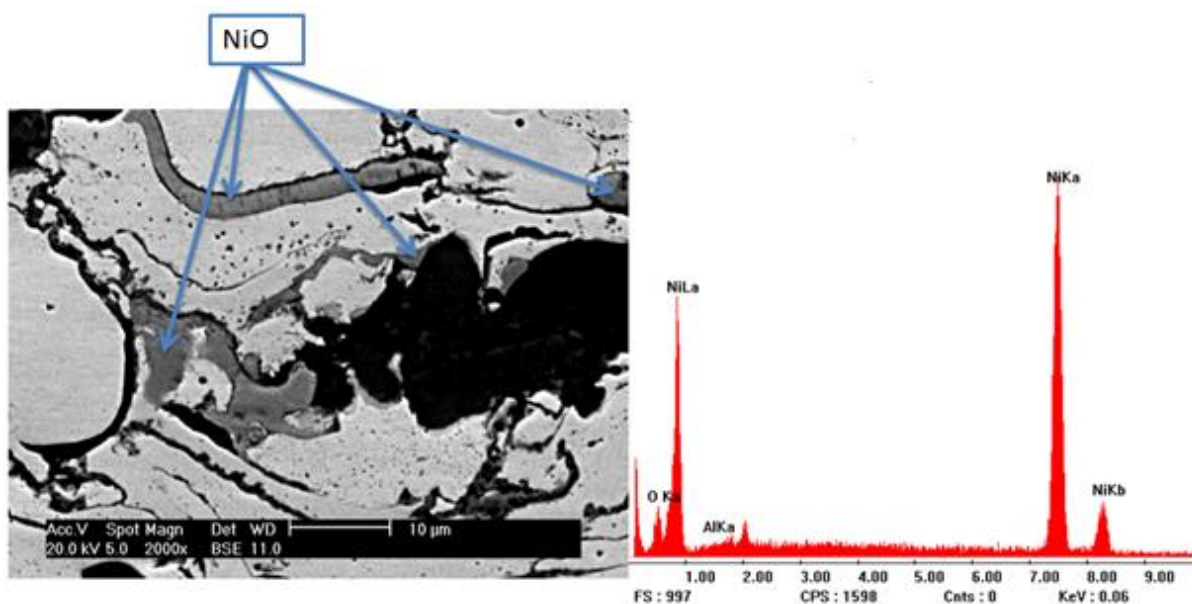


Figura 35 - a) Imagem MEV do revestimento 95%Ni5%Al e b) EDS.

Tabela 20 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	3,94	8,2
Ni	96,05	91,79

A Figura 36, indica a ocorrência de NiO, com uma coloração de cinza, mais escuro, indicados pelas setas azuis. Nessa área, também não se manteve a proporção de Ni-Al depositados (Tabela 21)



a)

b)

Figura 36 - a) Imagem MEV do revestimento 95%Ni5%Al e b) EDS.

Tabela 21 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, da Figura 36.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	3.742	12.429
Al	0,412	0,811
Ni	95,846	86,760

As amostras da Liga D foram as que tiveram o pior resultado nos ensaios de aderência e microdureza.

Comparando as amostras D1, D2 e D3, a amostra D3, foi a que obteve melhor resultado nos ensaios de aderência e microdureza, porém a que teve maior concentração de partículas não fundidas e inclusão de óxidos. A amostra D2, foi a que obteve melhor homogeneidade e menor inclusão de óxidos.

4.3.4 Análise da formação de fases observada via Difratometria de Raio X

Observando o difratograma(Figura 37) das amostras A, nota-se a formação das fases de intermetálicos NiAl e Ni₃Al, intermetálicos importantes para obtenção

da resistência a oxidação a altas temperaturas, e também fases oxidas como o NiO e um óxido composto NiAl_2O_4 , que é um óxido estável a alta temperatura.

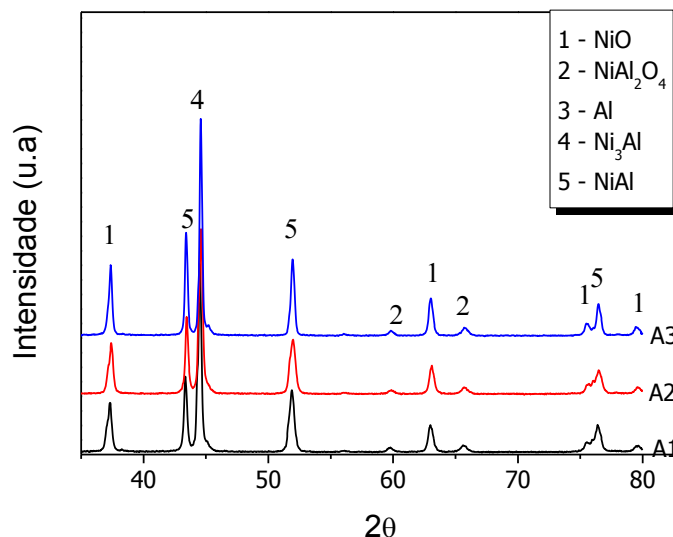


Figura 37 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga A Diamalloy

Comparando as amostras A1, somente deposição, A2, com pré aquecimento, e A3, com pré e pós-aquecimento, observa-se que não houve mudança de fases, com as amostras que sofreram tratamento térmico.

Na difratometria das Ligas B, C e D, é identificado um pico de Al, que não ocorreu na Liga A, e a formação de NiO e dos intermetálicos NiAl e Ni_3Al . Porém não houve a formação do óxido NiAl_2O_4 . Os filmes de óxido são muito finos, não sendo possível, muitas vezes, sua identificação por esta técnica (RODRIGUEZ 2003). Além disso, frações volumétricas menores que 5% não são detectadas pelo equipamento e os picos confundem-se com a radiação de fundo (PADILHA 2011).

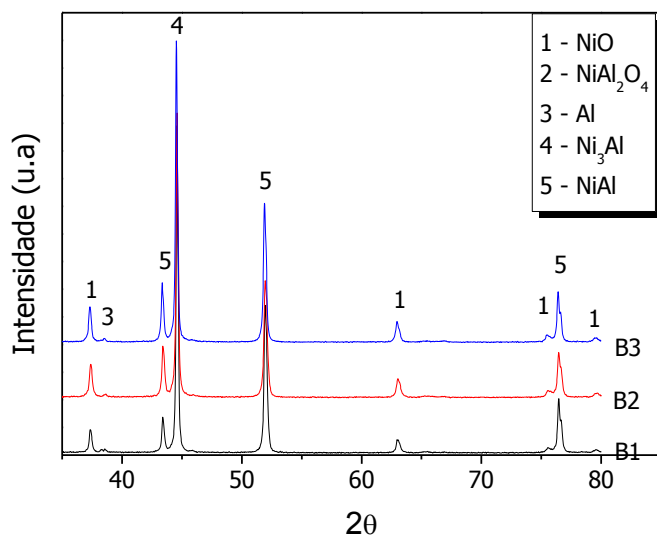


Figura 38 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga B

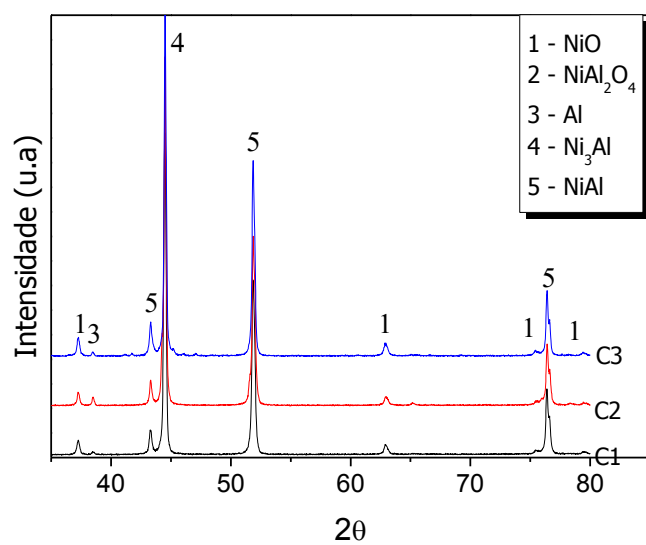


Figura 39 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga C

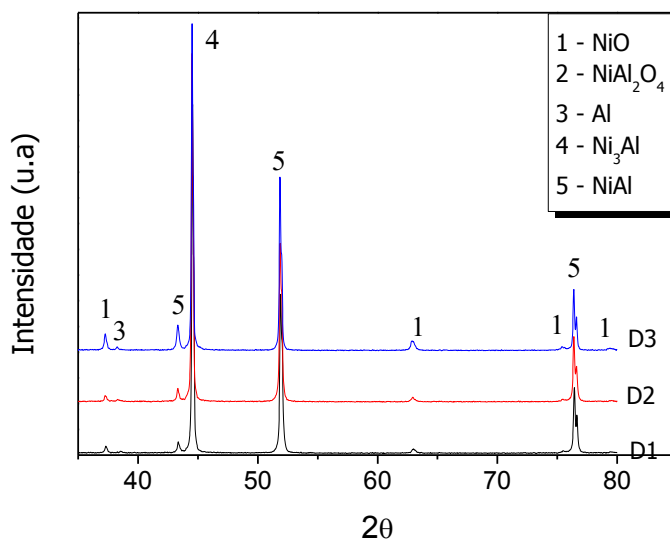


Figura 40 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga D

Comparando os difratogramas das Ligas B (Figura 38), C (Figura 39) e D (Figura 40), mesmo com porcentagens de Ni-Al diferentes, percebe-se, formação de fases iguais para todas as ligas.

Comparando os difratogramas das Ligas A, B, C e D, observa-se que em todas as ligas houve a formação dos intermetálicos NiAl e Ni_3Al , e a fase NiO. Não ocorreu mudança de fases para as diferentes condições de deposição. Porém na Liga A houve a formação do óxido NiAl_2O_4 , enquanto que nas outras ligas observa-se um pico de Al.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL APÓS EXPOSIÇÃO A 750°C E 850°C

4.4.1 Porosidade

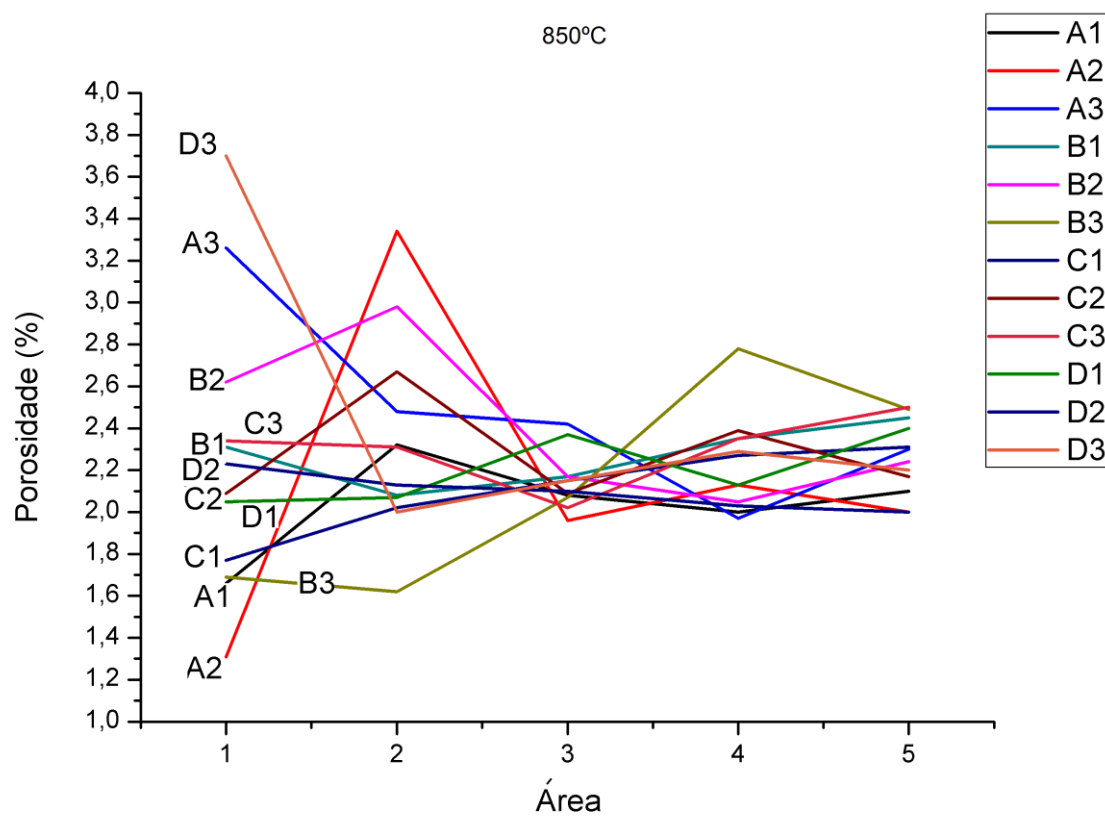
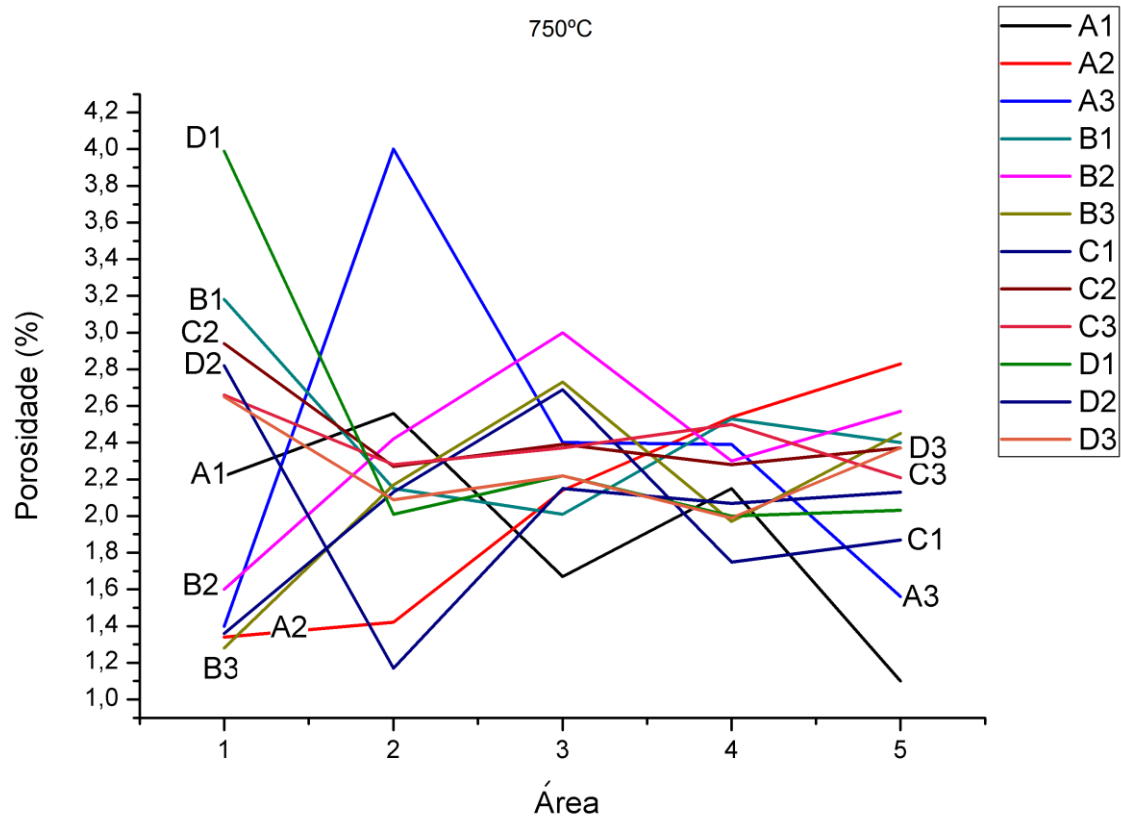
A Tabela 22 mostra o resultado da porcentagem de poros dos corpos de prova depois da exposição a 750°C e 850°C.

Tabela 22 - Média da % de poros após exposição a 750°C e 850°C.

Amostra	Valores Tabela 12 (pag.46)	750°C		850°C	
		Porosidade %	Desvio Padrão	Porosidade %	Desvio Padrão
A1	2,18	1,94	0,51	2,03	0,21
A2	2,86	2,06	0,59	2,15	0,66
A3	3,06	2,35	0,92	2,49	0,43
B1	2,48	2,45	0,40	2,27	0,13
B2	2,83	2,38	0,45	2,41	0,34
B3	2,54	2,12	0,49	2,13	0,45
C1	2,24	1,96	0,44	2,10	0,19
C2	2,49	2,45	0,25	2,28	0,22
C3	2,78	2,40	0,16	2,30	0,16
D1	2,49	2,45	0,77	2,20	0,15
D2	2,15	2,07	0,53	2,09	0,08
D3	2,74	2,26	0,23	2,47	0,62

Comparando a Tabela 22, com a Tabela 12 (página 46), observa-se que houve uma redução da porcentagem dos poros, depois da exposição a 750°C e 850°C, em todas as ligas. Isso ocorre, pois à elevada temperatura, há o coalesciamento das panquecas e a oxidação do material, que vão preenchendo os espaços e poros no revestimento.

Os gráficos 3 e 4 mostram os valores de porcentagem de poros para 750°C e 850°C, respectivamente.



4.4.2 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi refeito após exposição a 750°C e 850°C. Foram efetuadas 5 medidas de microdureza, na secção transversal do revestimento. A média das mesmas e o desvio padrão encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Média e Desvio Padrão, da microdureza Vickers, das amostras após exposição a 750°C e 850°C

Amostra	Valores Tabela 13 (pag. 47)	750°C		850°C	
		Média (HV ₀₃)	Desvio Padrão	Média (HV ₀₃)	Desvio Padrão
A1	232,3	320	46,64	253,8	68,35
A2	262,8	299,4	26,18	310,4	17,51
A3	295	310,8	29,3	353	53,19
B1	189,9	286	52,68	287	20,91
B2	202,9	385	48,09	357,2	18,23
B3	233,4	327,4	40,78	335,8	40,1
C1	157,1	271,6	38,28	255,6	28,54
C2	165,4	244,6	25,97	261,4	23,65
C3	187,5	303,8	23,51	216,2	13,62
D1	123,8	225	13,38	242	23,32
D2	141	224,6	23,8	206,2	14,13
D3	165,7	188	39,3	217,4	16,75

Comparando a Tabela 23 com a Tabela 13 (página 47), percebe-se que houve um aumento na microdureza, de todas as amostras.

Diferente das amostras antes da exposição a 750°C e 850°C, não há como afirmar que o as amostras que sofreram tratamento térmico de pré e pós-aquecimento, têm valores de microdureza maiores, que as amostra com pré-aquecimento e sem tratamento térmico. Assim como, não há como afirmar que as

amostras da Liga A, é a liga com maior microdureza, pois as Ligas B e C, tiveram valores próximos as e alguns maiores que a Liga A.

A Liga D, que contém a mesma porcentagem de Ni-Al, que a Liga A, foi a que obteve os menores valores de microdureza.

Nos gráficos 5 e 6, observam-se todos os resultados de microdureza, para 750°C e 850°, respectivamente.

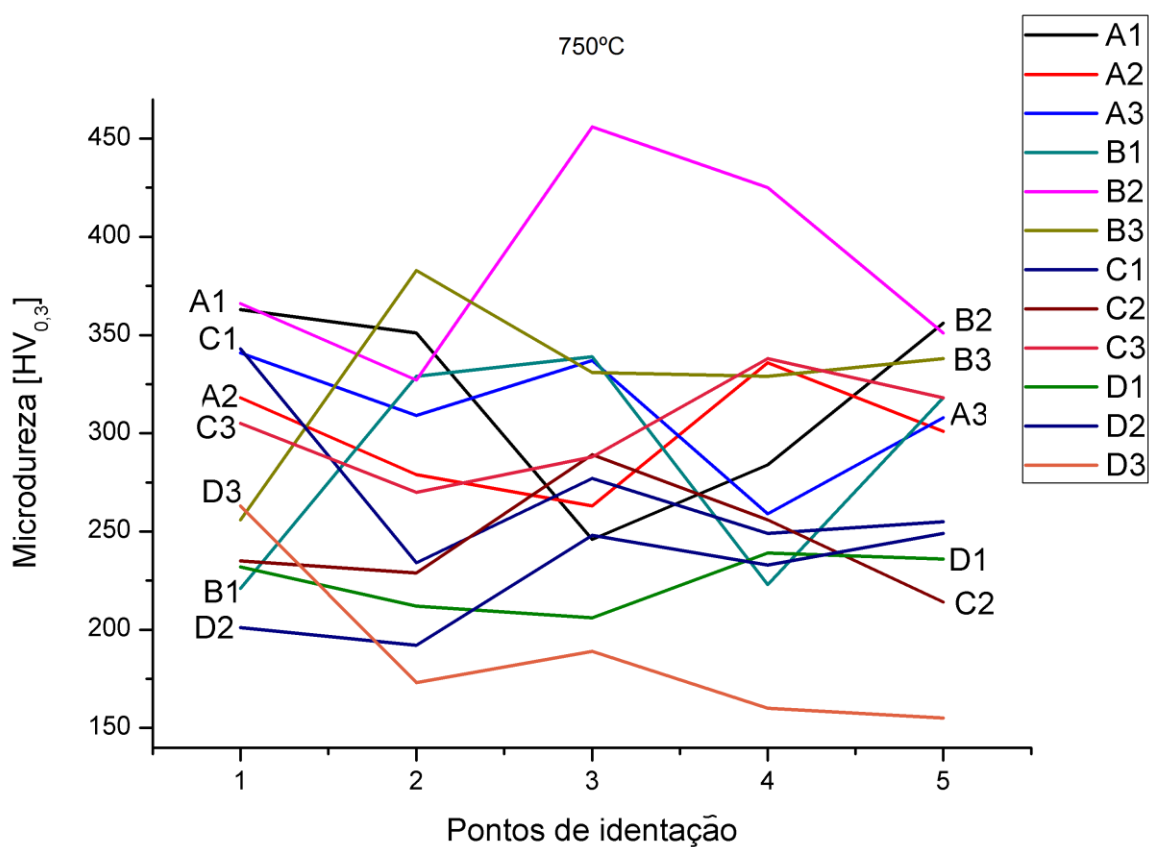


Gráfico 5 - Microdureza 750°C

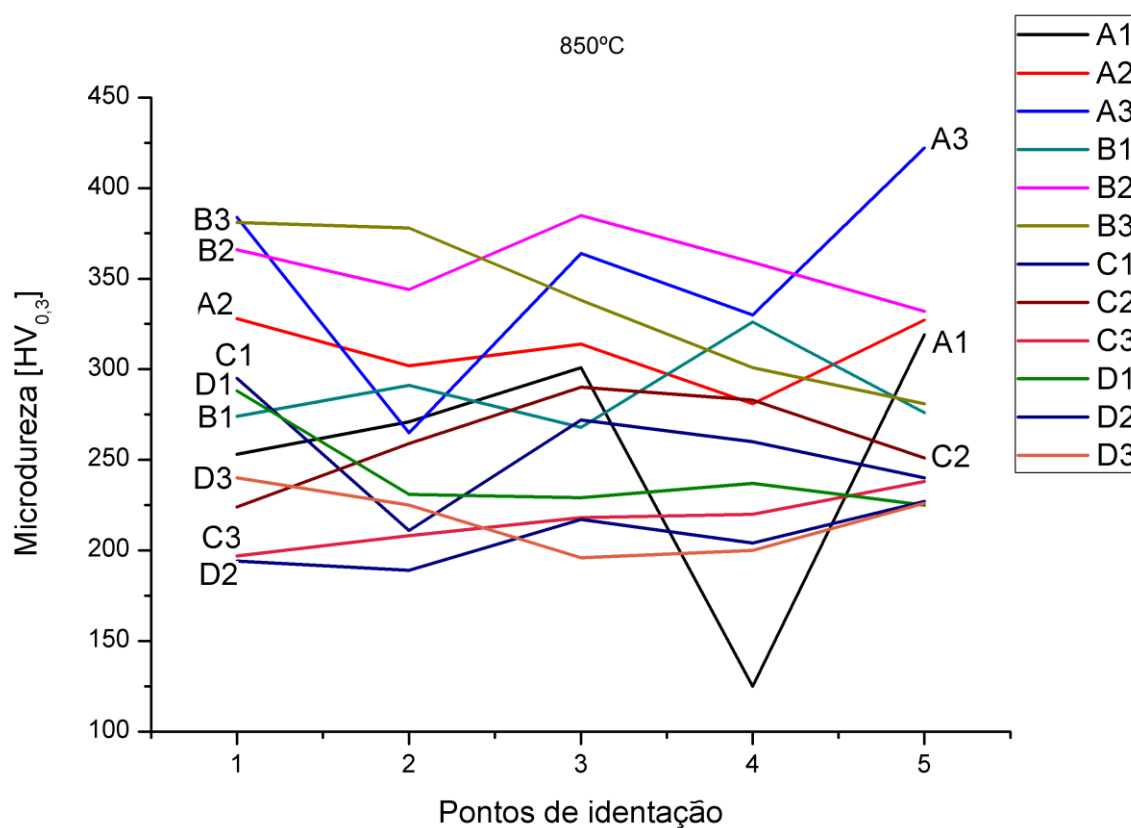


Gráfico 6 - Microdureza 850°C

4.4.3 Análise dos revestimentos em corte transversal via microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura + EDS

4.4.3.1 Microestrutura da deposição da Liga A – Diamalloy 4008 NS 95%Ni 5%Al

Observando as Figuras 41, 42 e 43, nota-se que nas amostras que foram expostas a 850°C, comparadas com as amostras que foram expostas a 750°C, tiveram uma maior inclusão de óxidos e uma maior oxidação. Os revestimentos que sofreram exposição a 750°C, têm menor inclusão de óxidos e suas panquecas estão bem definidas.

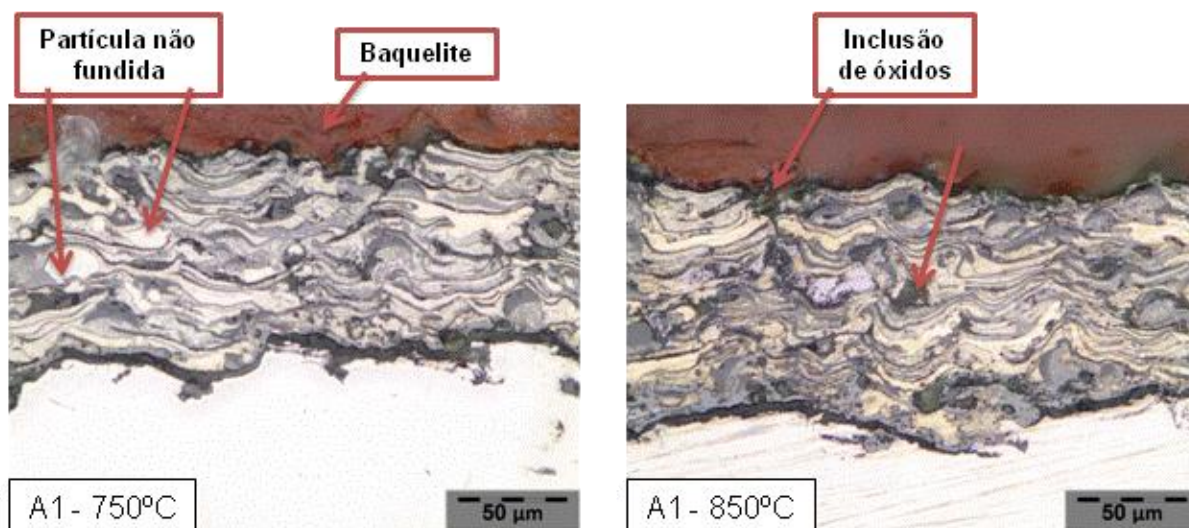


Figura 41 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostra A1, a 750°C e 850°C.

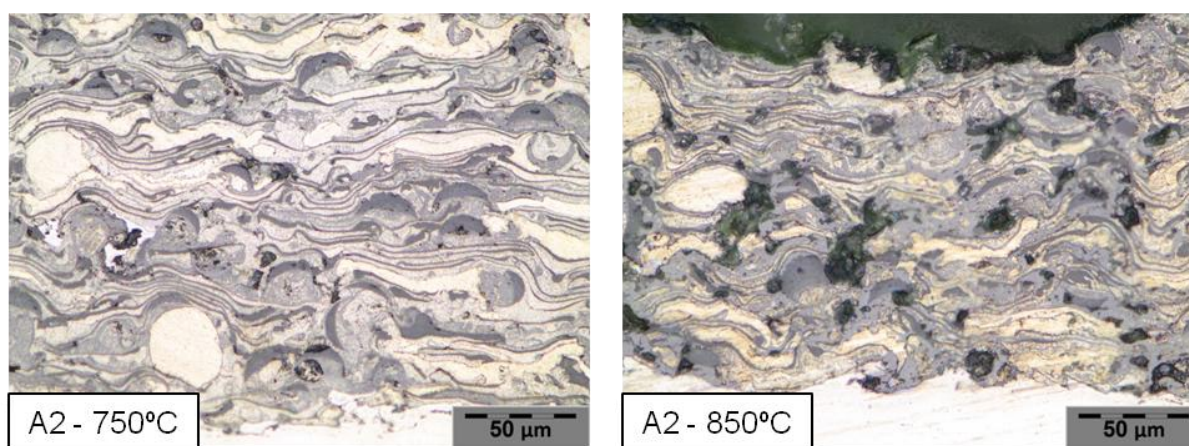


Figura 42 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostras A2, a 750°C e 850°C.

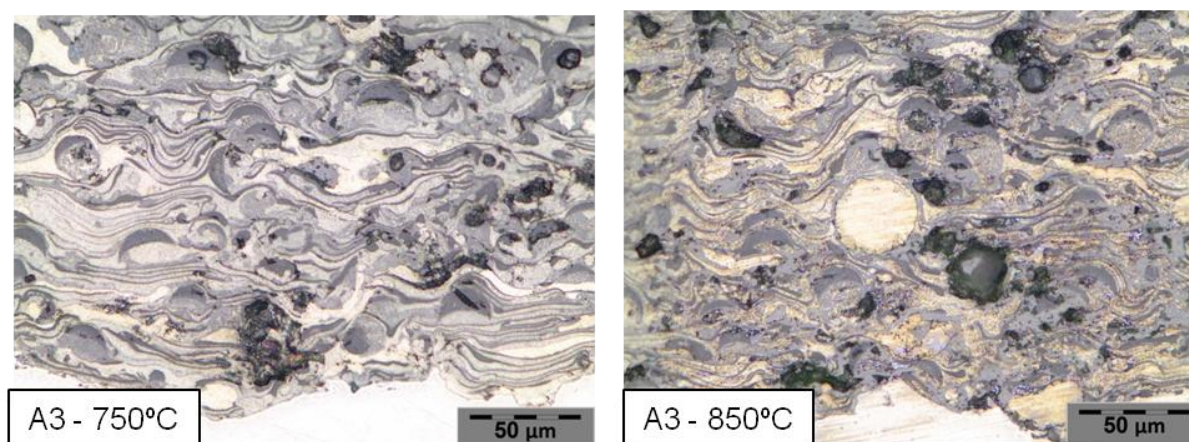


Figura 43 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga A, amostras A3, a 750°C e 850°C.

Comparando as Figuras 41, 42 e 43 com a Figura 25 (Página 49), nota-se um aumento da quantidade de óxidos e um aumento da homogeneidade do revestimento.

Comparando a Figura 44, com a Figura 26 (Página 50), percebe-se uma maior homogeneidade e um aumento de óxidos de níquel e alumínio. O EDS anterior (Figura 26) não indicou o elemento óxido, enquanto que no da Figura 44 aparece um pico de óxido e um de ferro, provavelmente do substrato AISI 304 difundido pelo revestimento.

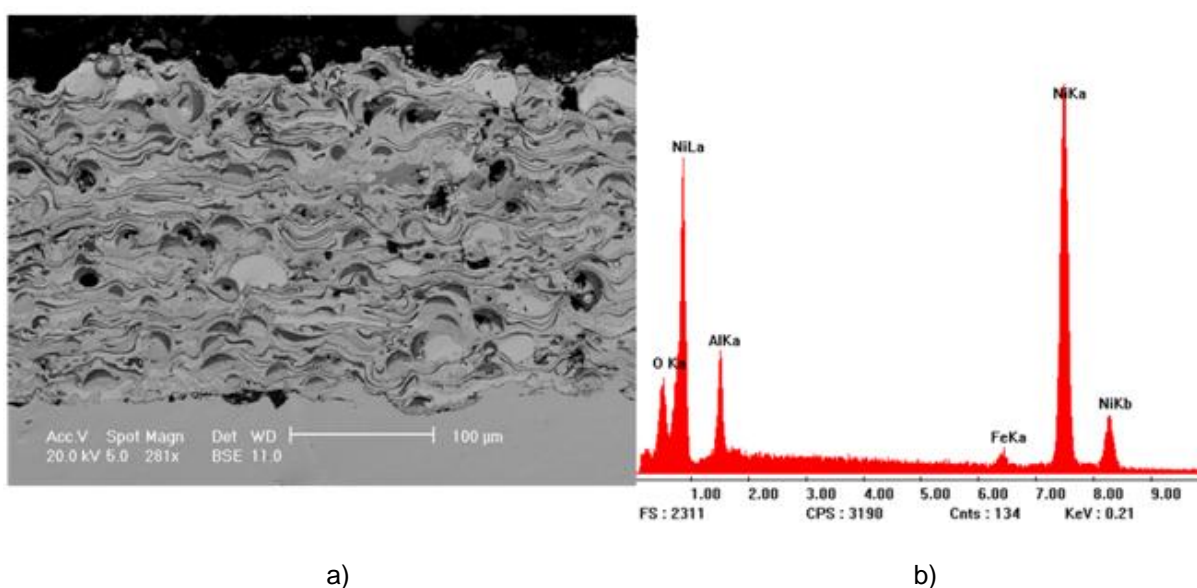


Figura 44 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga A.

Tabela 24 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A na Figura 44.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	6,796	19,494
Al	8,252	14,036
Fe	1,638	1,346
Ni	83,313	65,124

Observando a Figura 45, as setas azuis indicam óxidos de níquel (formato “meia lua”). Os óxidos de alumínio estão nos contornos dos óxidos de níquel e contornos das panquecas. A Tabela 25 mostra a quantificação dessa imagem.

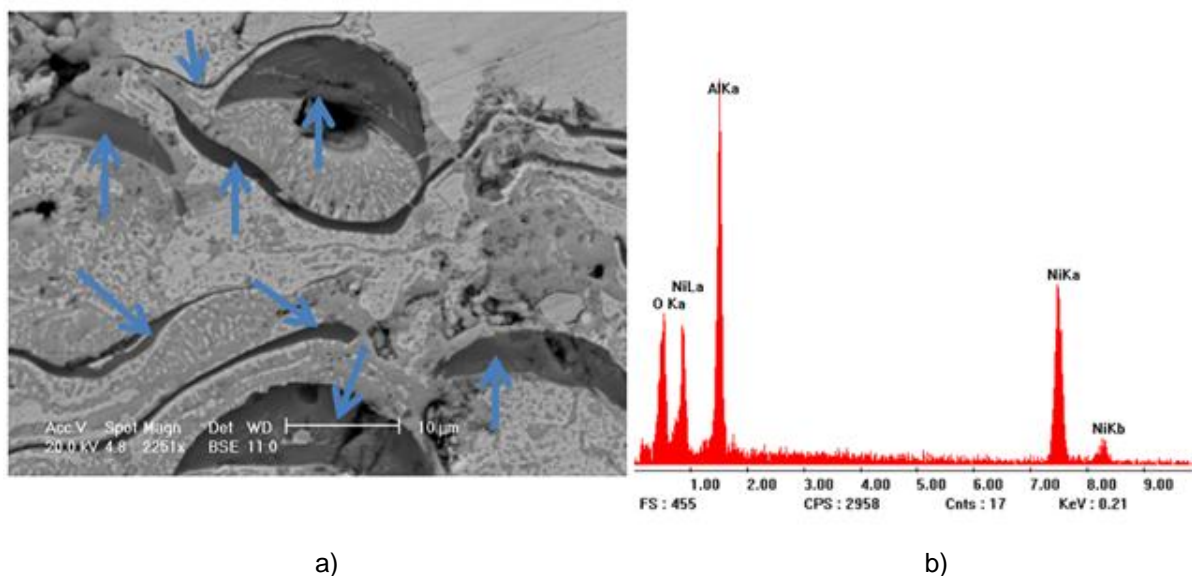


Figura 45 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga A, ampliação da Figura 44.

Tabela 25 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A na Figura 44.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	7,014	19,77
Al	9,757	16,305
Ni	83,229	63,924

Na Figura 46, as setas azuis indicam os óxidos de níquel, que têm a coloração cinza, enquanto as laranjas, apontadas para a parte mais clara da imagem, são níquel puro. A Tabela 26 mostra a quantificação dos elementos presentes na área representada pelas setas.

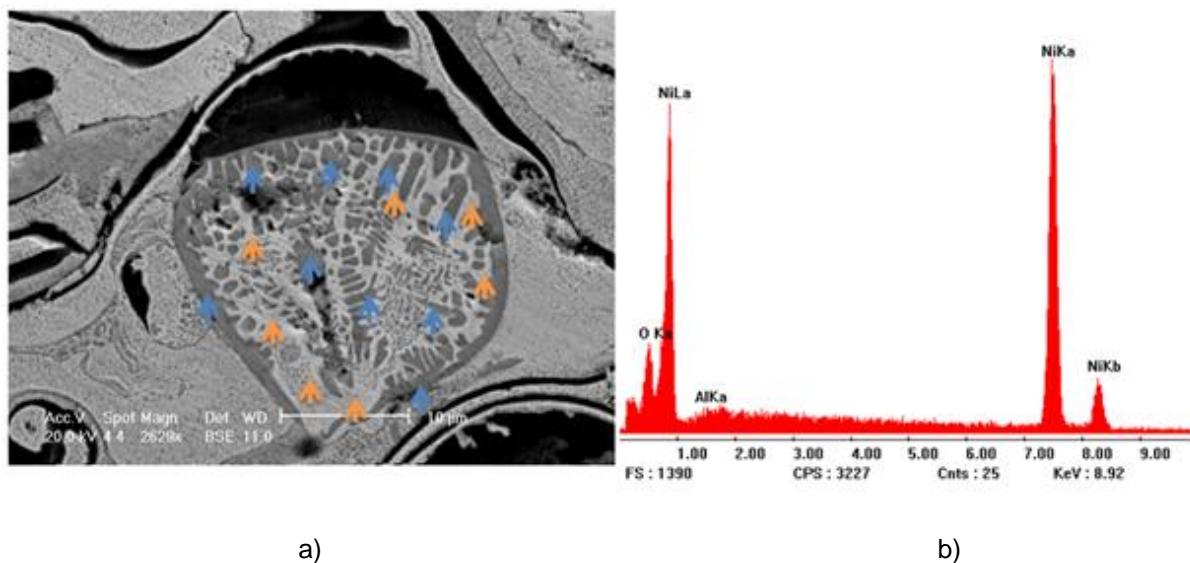


Figura 46 - a) Imagem do óxido de níquel b) EDS liga A.

Tabela 26 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga A Figura 46.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	6,125	19,148
Al	0,871	1,615
Ni	93,004	79,237

Analisando a Liga A, antes e depois da exposição a 750°C e 850°C, nota-se que houve um aumento na quantidade de óxidos, observado no EDS e Tabela de quantificação, também ocorreu uma maior homogeneidade nos revestimentos, observada através das imagens de MEV assim como um aumento nos intermetálicos formados após a exposição a 750°C e 850°C.

4.4.3.2 Microestrutura da deposição da mistura B – 73%Ni 27%Al

Nas Figuras 47, 48 e 49, observam-se inclusões de óxidos principalmente na amostra B1 a 850°C. As Figuras 48 e 49 sugerem que o pré-aquecimento favorece o efeito de molhabilidade da superfície aspergida, gerando uma maior homogeneidade das camadas, evidenciada pela formação mais regular das panquecas. A amostra

B2 é a que contém um revestimento mais homogêneo, tanto a 750°C quanto a 850°C.

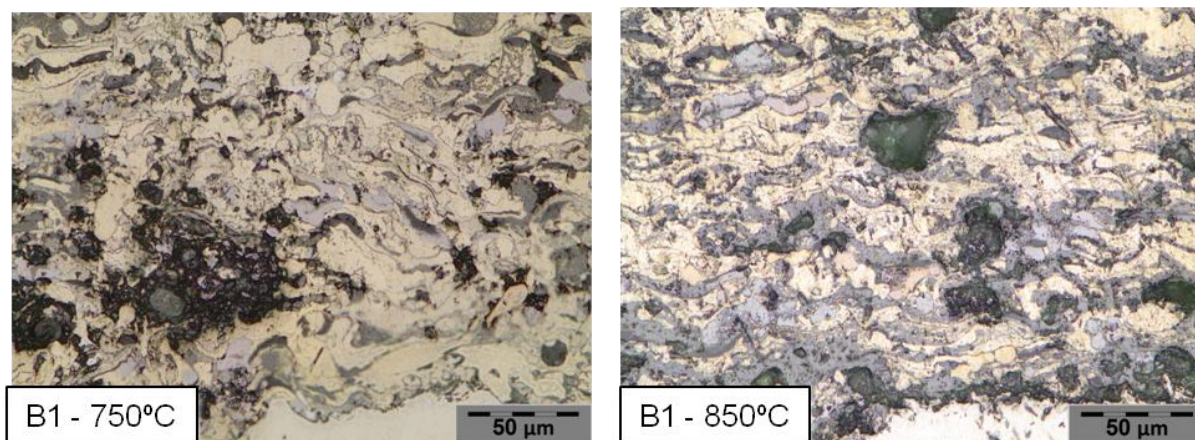


Figura 47 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B1, 750°C e 850°C.

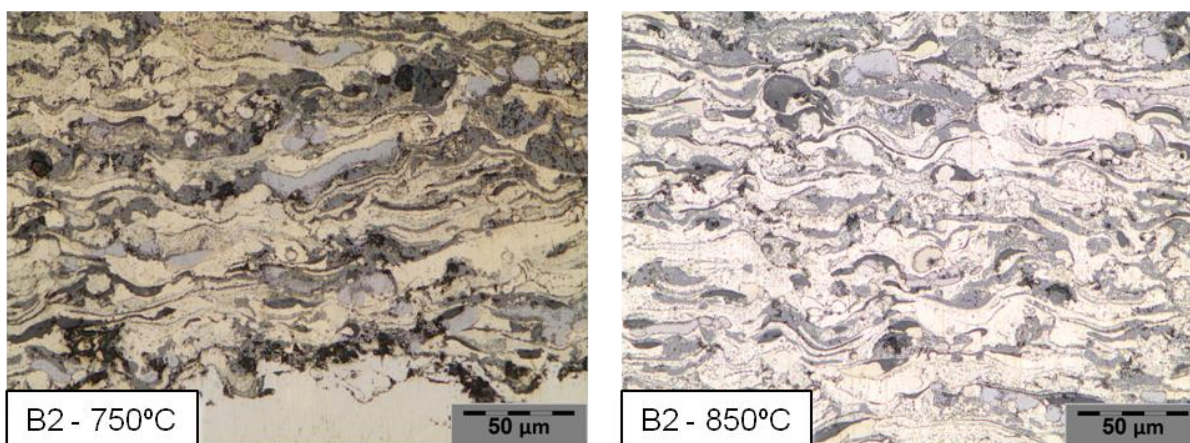


Figura 48 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B2, 750°C e 850°C.

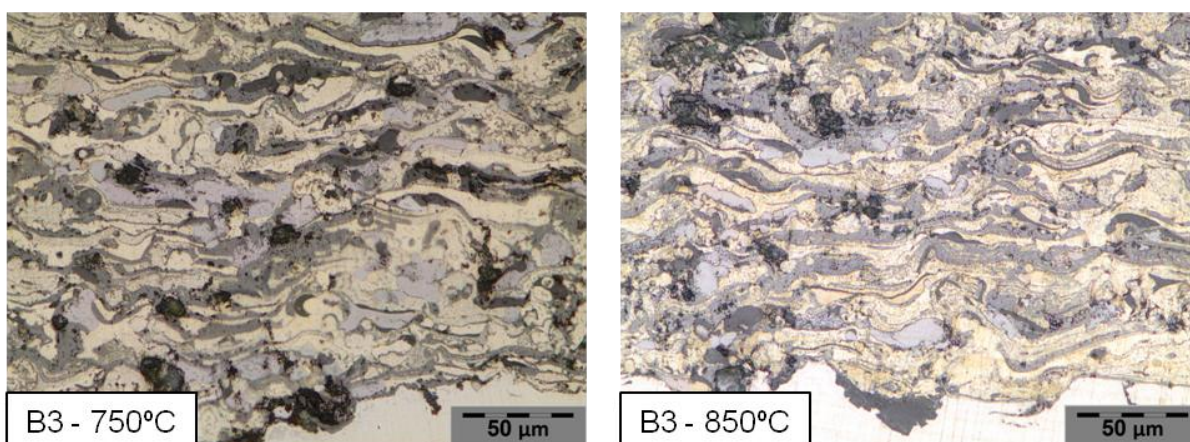


Figura 49 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga B, amostras B3, 750°C e 850°C.

Comparando as Figuras 47, 48 e 49, com a Figura 28 (Página 52), observa-se que não ocorreu grande mudança no revestimento das amostras B2 e B3 para as amostras que sofreram exposição a 750°C e 850°C. Na amostra B1, há um aumento de inclusão de óxidos e presença de óxidos após exposição a 750°C e 850°C.

Observando a Figura 50 e comparando-a com a Figura 29 (Página 53), nota-se que não houve mudança na liga B, mesmo depois da exposição a 750°C e 850°C. Porém no EDS da Figura 50 aparece um pico de oxigênio. A Tabela 27 mostra a quantificação dos elementos presentes na Figura 50.

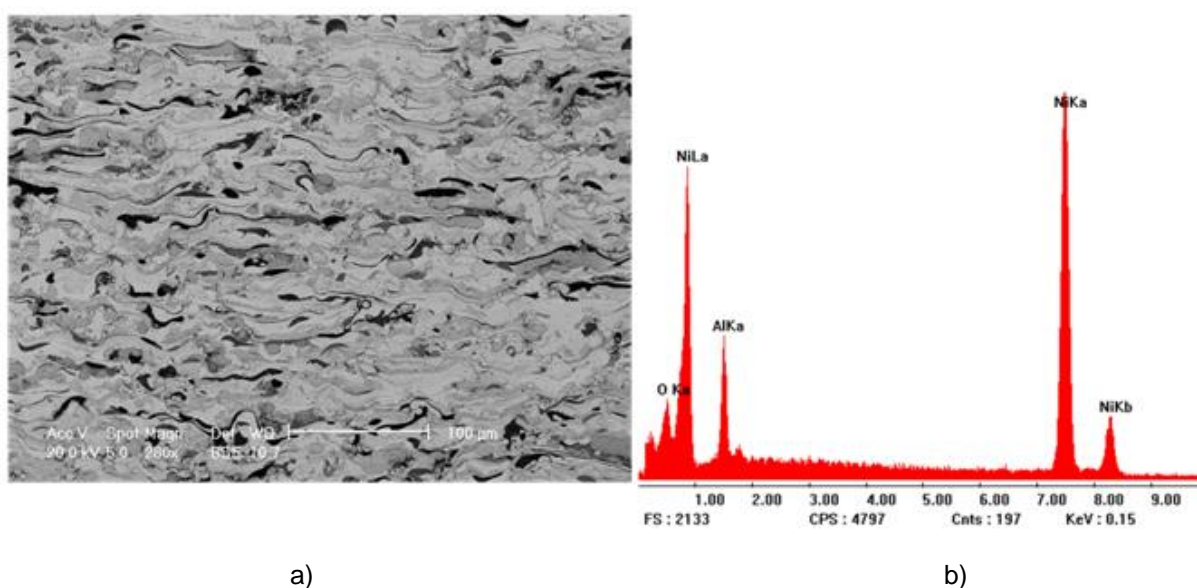


Figura 50 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga B, 73%Ni27Al.

Tabela 27 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B da Figura 50.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	5,421	15,863
Al	9,3	16,136
Ni	85,279	68,001

A Figura 51 mostra os intermetálicos NiAl, indicados pelas setas vermelhas, em todas as amostras esse intermetálico aparece com a mesma coloração e morfologia. A Tabela 28 mostra a quantificação da área analisada.

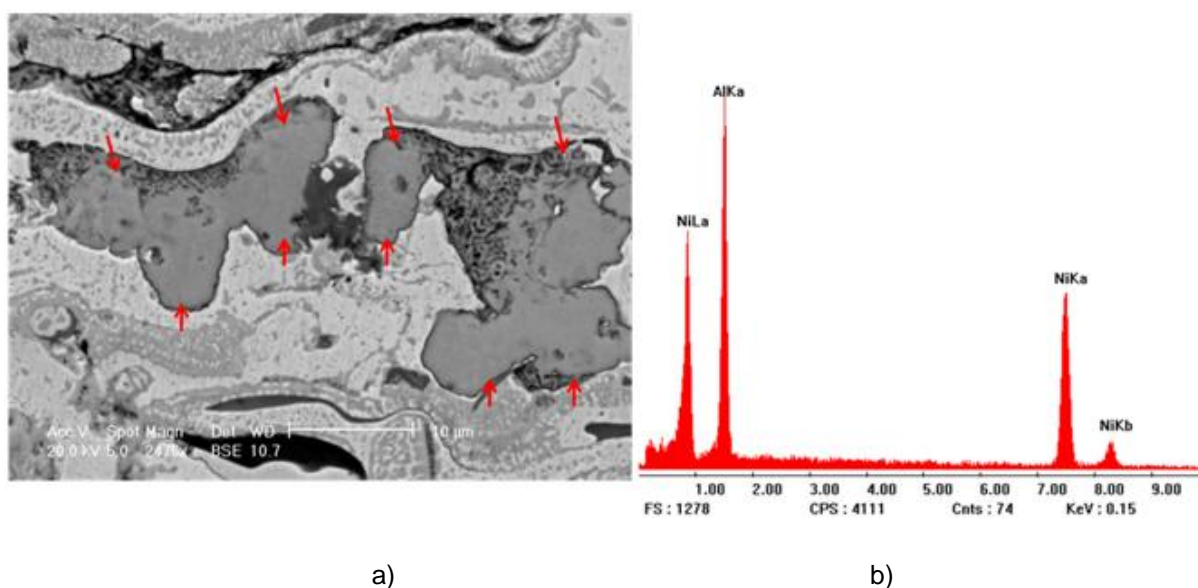


Figura 51 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga B, ampliação da imagem 50.

Tabela 28 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga B na Figura 51.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	34,637	55,715
Ni	65,363	44,285

A coloração mais escura, indicada com setas verdes, na Figura 52, é identificada, pelo EDS, como óxidos de alumínio. A Tabela 29 quantifica os elementos encontrados na imagem.

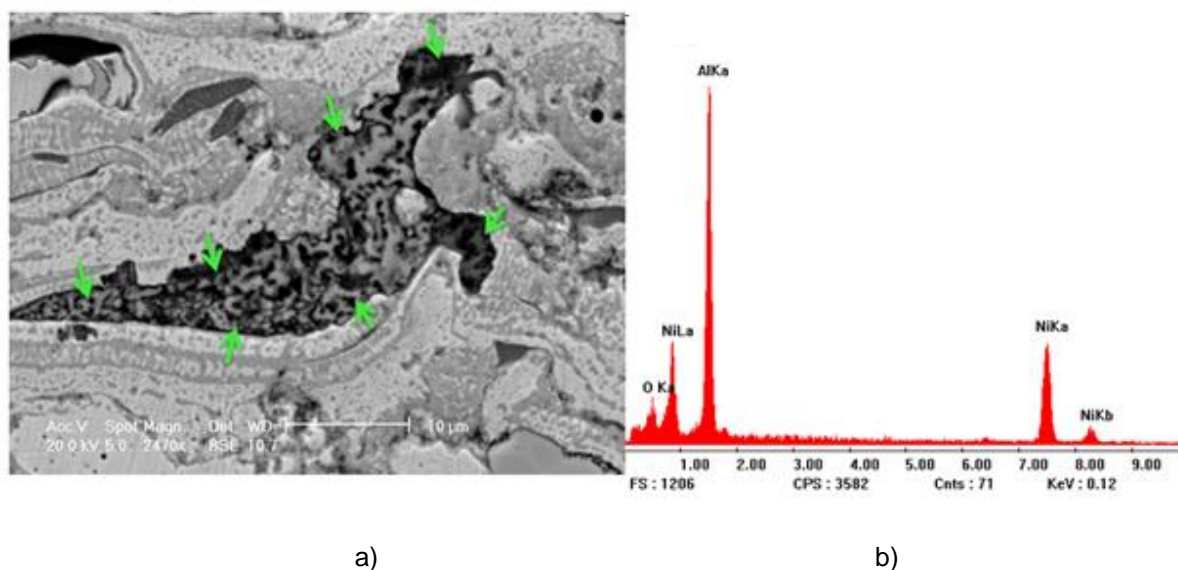


Figura 52 - a) Imagem dos óxidos de alumínio em MEV e b) EDS da liga B.

Tabela 29 - Quantificação dos elementos no revestimento produzido pela liga B da Figura 52

Elemento	% Peso	% Atômico
O	7,304	15,74
Al	43,195	55,192
Ni	49,501	29,068

A Liga B, depois da exposição a 750°C e 850°C, apresentou um aumento na quantidade de óxidos e maior presença de intermetálicos NiAl. Através das imagens do MEV observa-se uma maior homogeneidade do revestimento.

4.4.3.3 Microestrutura da deposição da mistura C – 87%Ni 13%Al

Observando as Figuras 53, 54 e 55, nota-se que as amostras que sofreram exposição a 850°C, apresentaram maior inclusão de óxidos e presença de óxidos. A amostra C3, foi a que obteve maior quantidade de partículas coalescidas, com um revestimento denso e homogêneo.

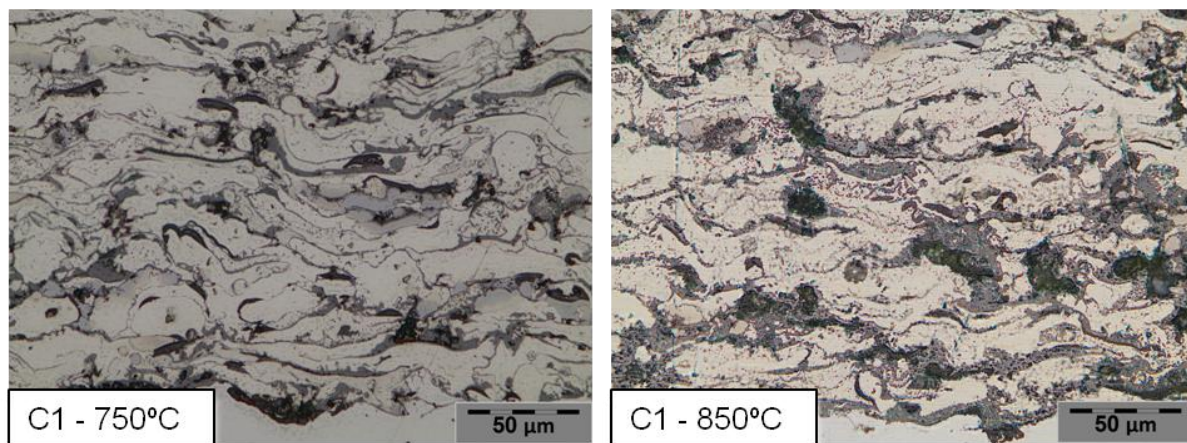


Figura 53 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C1, 750°C e 850°C.

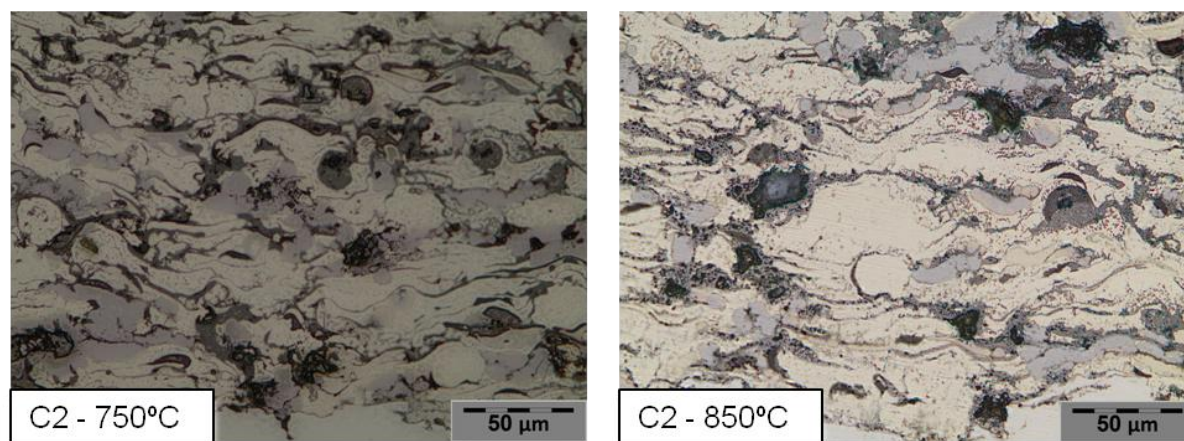


Figura 54 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C2, 750°C e 850°C.

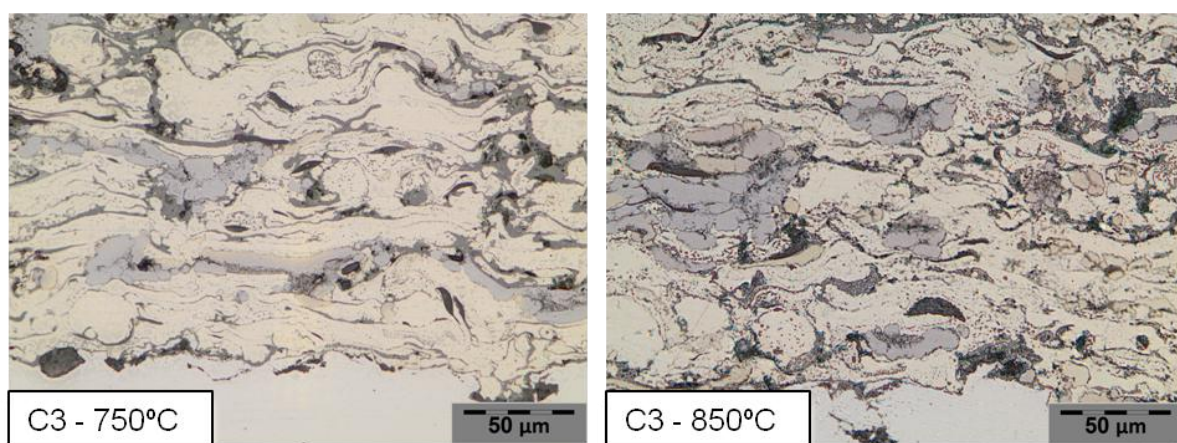


Figura 55 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga C, amostras C3, 750°C e 850°C.

Comparando as Figuras 53, 54 e 55 com a Figura 31 (Página 55), percebe-se que na amostra C3-750°C, não houve grande mudança para a microestrutura antes da exposição a 750°C. Ocorreu um aumento na presença de óxidos e inclusão de óxidos.

A Figura 56, Liga C, mostras um revestimento com maior presença de intermetálicos NiAl, panquecas coalescidas de níquel, e presença de óxido de níquel e alumínio. A Tabela 30 quantifica os elementos presentes na microestrutura observada.

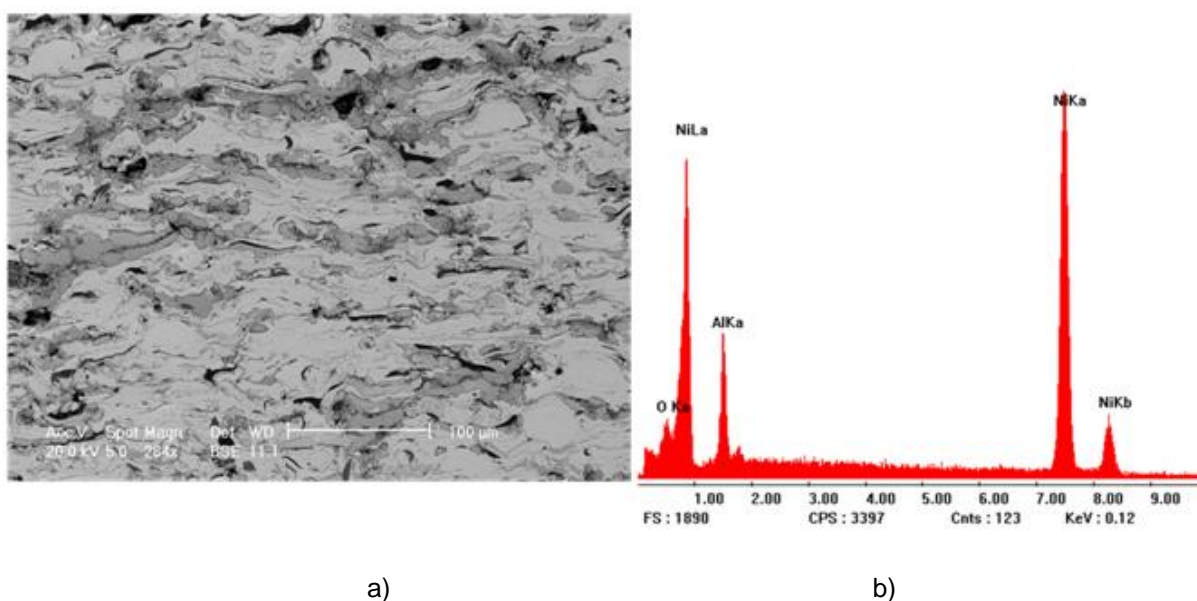


Figura 56 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga C, 87%Ni13%Ni.

Tabela 30 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga C.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	4,183	12,493
Al	9,953	17,626
Ni	85,864	69,882

Na Figura 57, as setas vermelhas indicam o intermetálico NiAl, e as setas laranjas indicam o elemento níquel. A Tabela 31 mostra os elementos presentes na Figura 57.

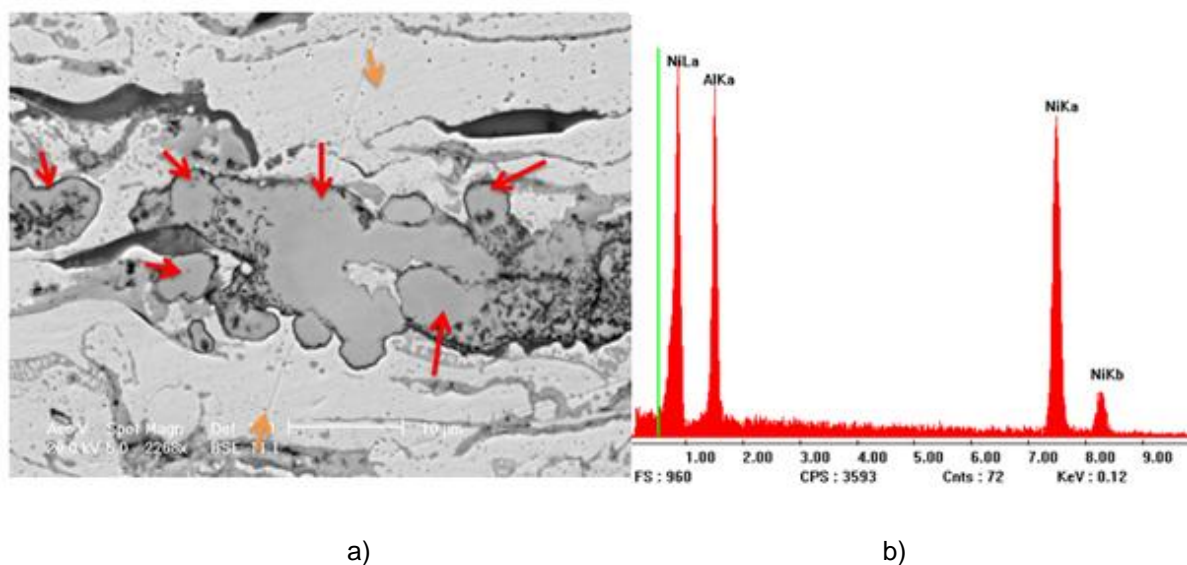


Figura 57 - a) Imagem em MEV e b) EDS da liga C, ampliação da Figura 56.

Tabela 31 - Quantificação dos elementos presente no revestimento produzido pela liga C na Figura 57.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	25,3	42,428
Ni	74,7	57,572

A Liga C, depois da exposição a 750°C e 850°C, mostrou um aumento dos intermetálicos NiAl, com um revestimento bastante homogêneo e com poucos óxidos.

4.4.3.4 Microestrutura da deposição da mistura D – 95%Ni 5%Al

Observando as microestruturas nas Figuras 58, 59, 60 nota-se que as amostras que sofreram exposição a 850°C, apresentaram uma maior inclusão de óxidos e maior presença de óxidos. A amostra D3, foi a que obteve um revestimento mais homogêneo e denso, com bastante coalescimento das panquecas, pouca inclusão de óxidos e presença de óxidos.

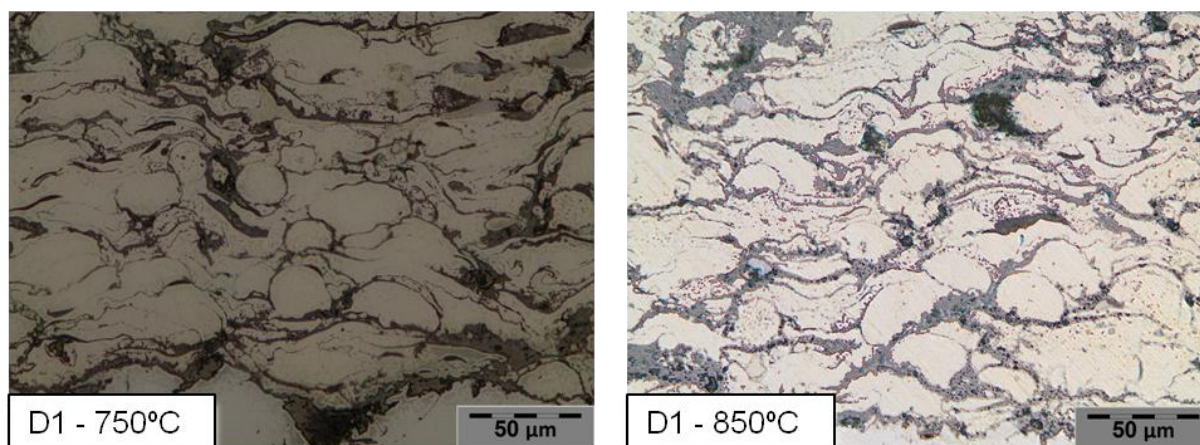


Figura 58 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D1, 750°C e 850°C.

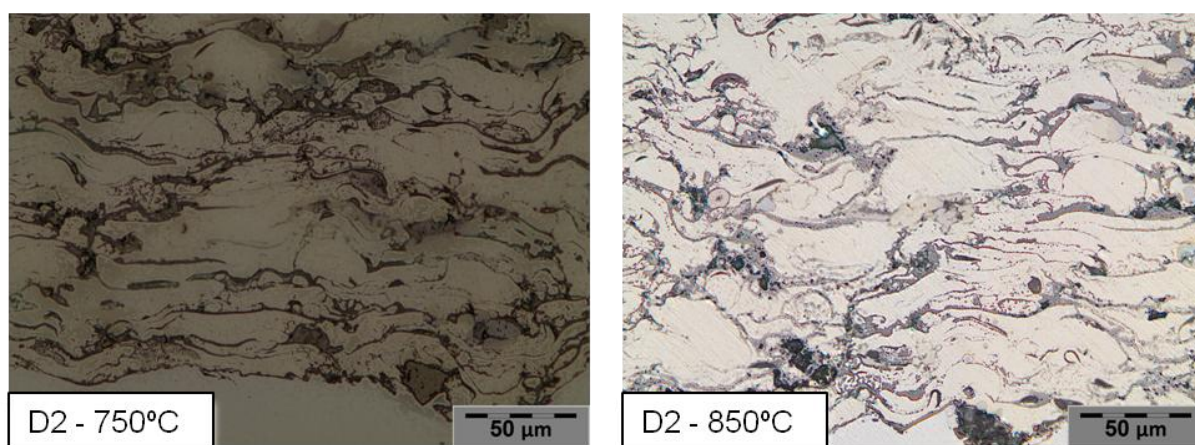


Figura 59 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D2, 750°C e 850°C.

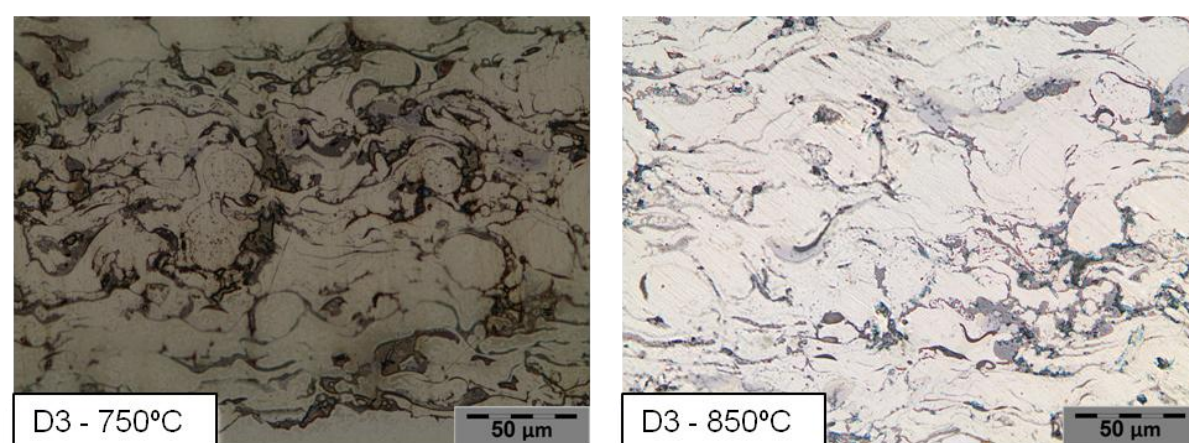


Figura 60 - Microestrutura do corte transversal do revestimento depositado pela liga D, amostras D3, 750°C e 850°C.

Comparando as Figuras 58, 59, 60, com a Figura 34 (Página 58) nota-se que ocorreu um aumento de óxidos e o coalescimento das partículas.

Observando a Figura 61, nota-se um revestimento homogêneo, com partículas de níquel, não fundidas, poucos óxidos e presença de óxidos de níquel. A Tabela 32 quantifica os elementos presentes na liga D.

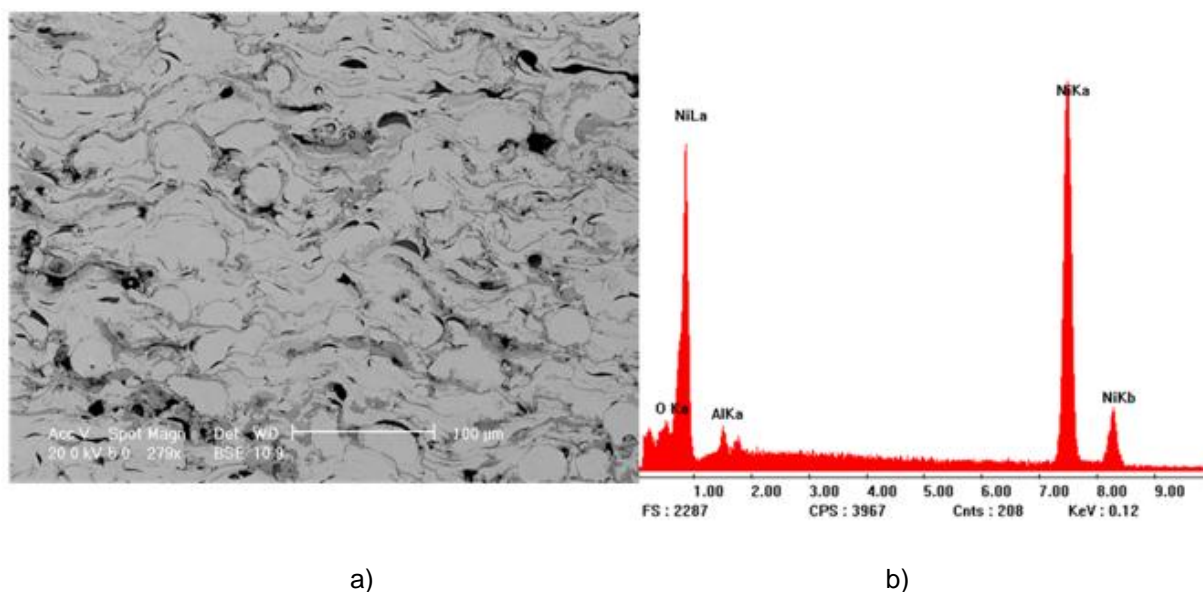


Figura 61 - a) Imagem do revestimento em MEV e b) EDS da liga D, 95%Ni5%Al.

Tabela 32 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, na Figura 61.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	3,73	12,102
Al	2,663	5,123
Ni	93,608	82,774

A Figura 64 mostra uma partícula, não fundida, de níquel, indicada pela seta laranja, a Tabela 33 quantifica essa imagem.

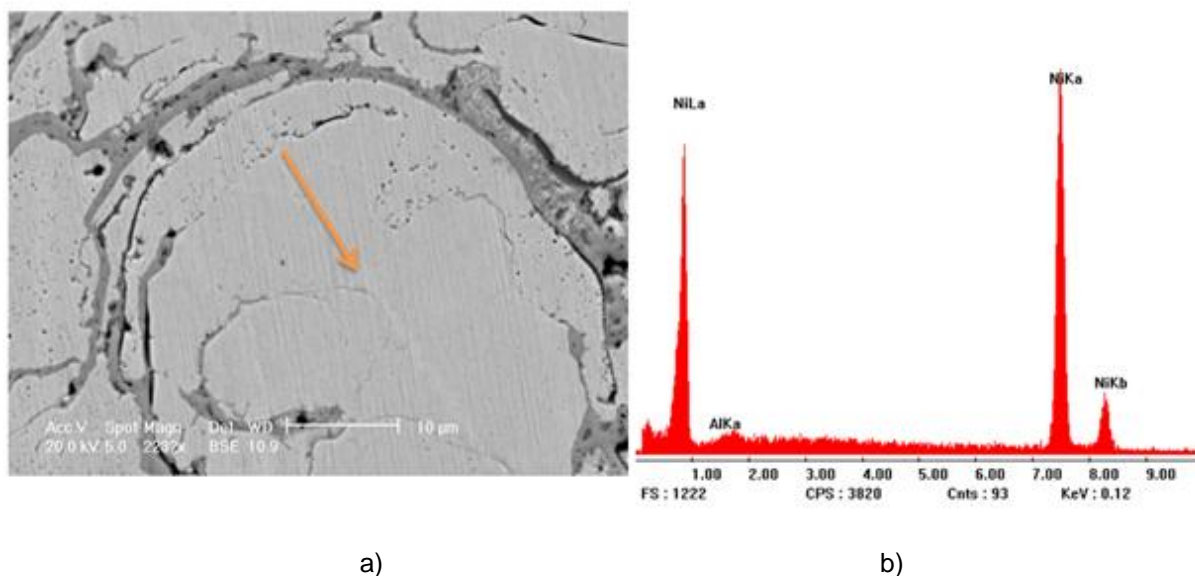


Figura 62 - a) Imagem da partícula de níquel e b) EDS da liga D.

Tabela 33 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D na Figura 62.

Elemento	% Peso	% Atômica
Al	0,891	1,919
Ni	99,109	98,081

Na Figura 63, as setas azuis indicam a formação de óxido de níquel, esses óxidos ficam ao redor das partículas de níquel, não fundidas. A Tabela 34 quantifica os elementos presentes na imagem.

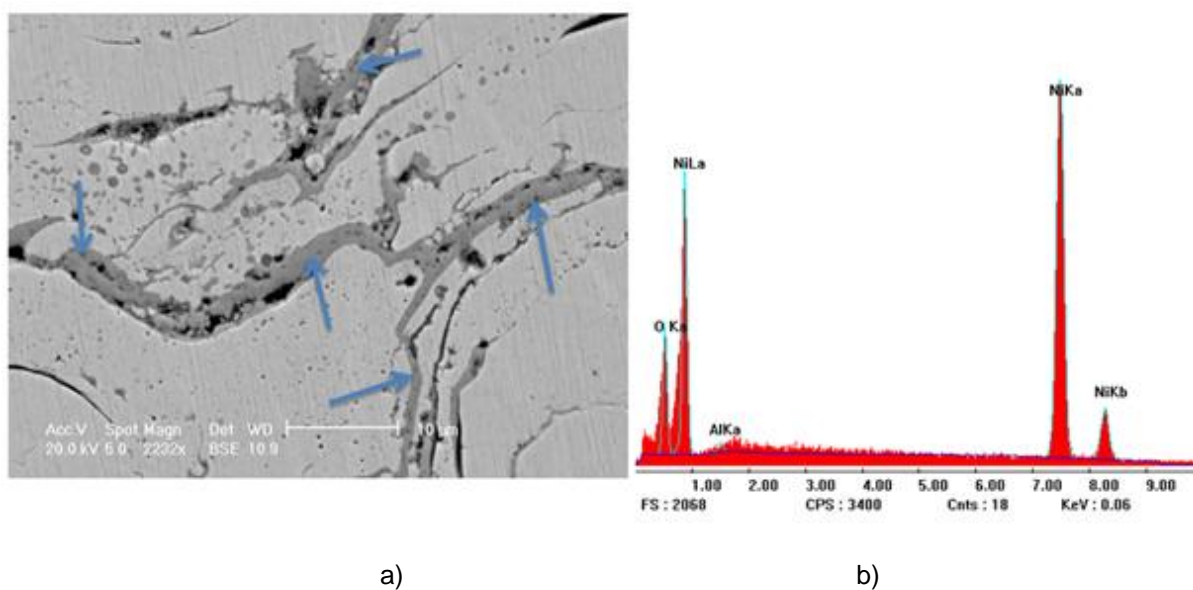


Figura 63 - a) Imagem do óxido de níquel e b) EDS da liga D.

Tabela 34 - Quantificação dos elementos presentes no revestimento produzido pela liga D, na Figura 63.

Elemento	% Peso	% Atômica
O	9,632	27,902
Al	0,818	1,406
Ni	89,55	70,693

Na liga D, houve maior formação de NiO, pois contém 95%Ni, porém mesmo sendo a liga com menor porcentagem de alumínio ocorreu a formação de NiAl.

4.4.4 Análise da formação de fases observada via Difratometria de Raio X

As Figuras 64, 65 e 66 representam os difratogramas da Liga A. Nota-se que não houve mudança de fase depois da exposição a 750°C e 850°C.

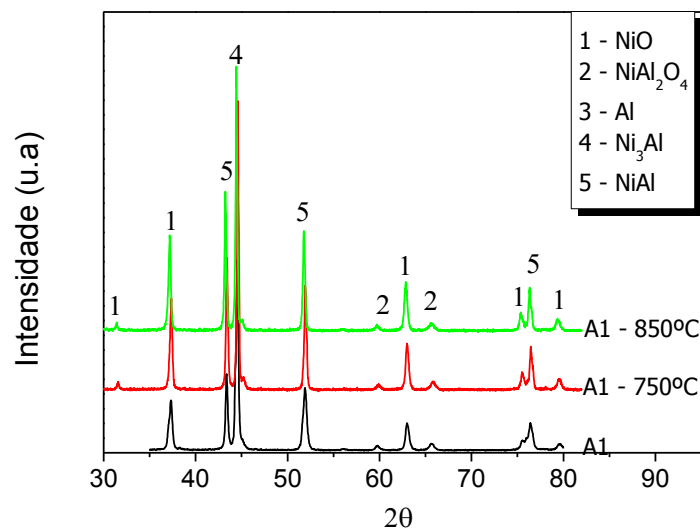


Figura 64 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A1.

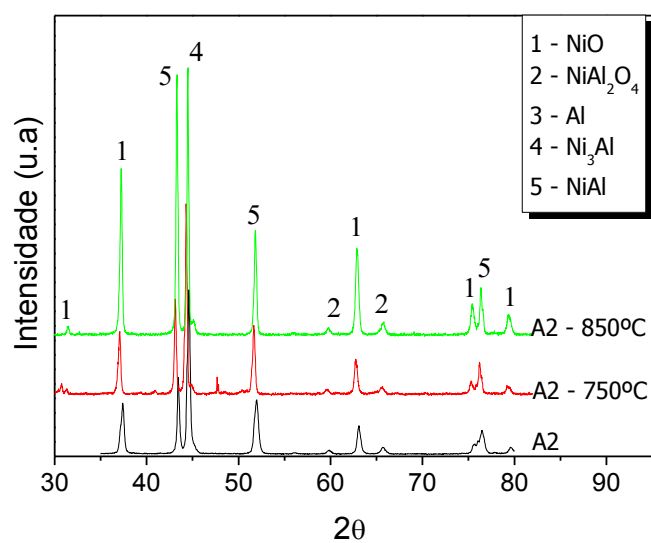


Figura 65 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A2.

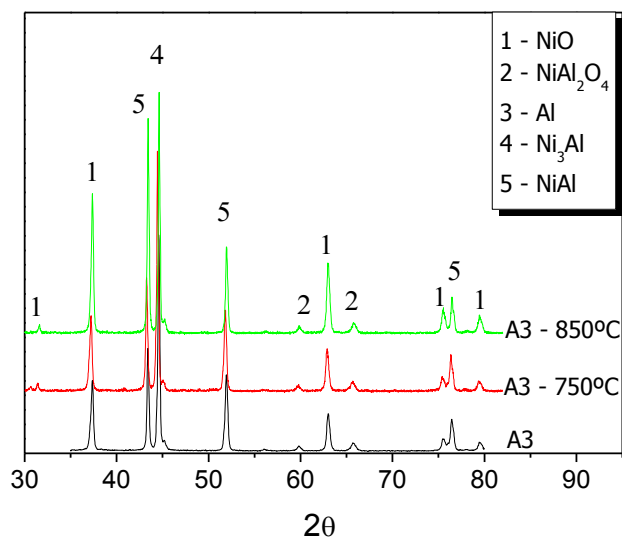


Figura 66 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga A, amostra A3.

Comparando os diagramas das amostras A1, A2 e A3, também não se verifica uma mudança na fase.

As Figuras 67, 68 e 69 representam os difratogramas da Liga B. Observando as imagens, nota-se que não ocorre nenhuma mudança de fase nas amostras que sofreram exposição a 750°C e 850°C.

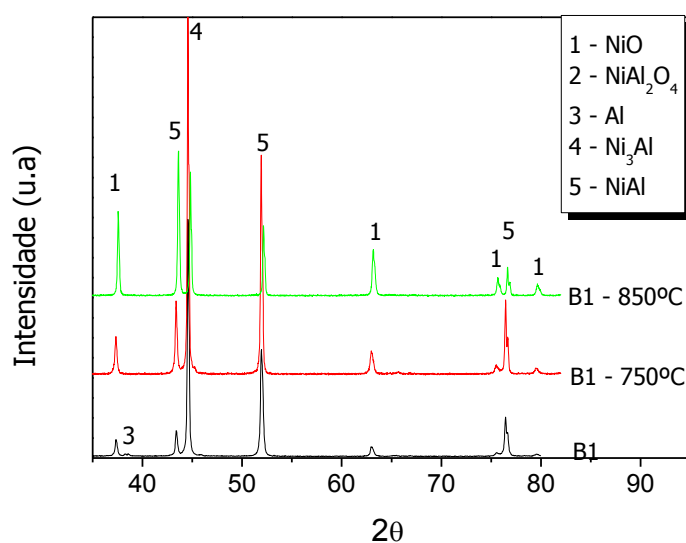


Figura 67 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B1.

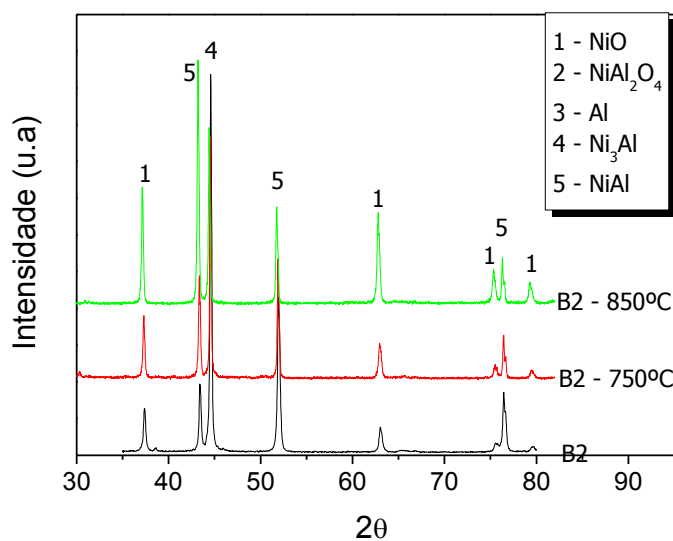


Figura 68 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B2.

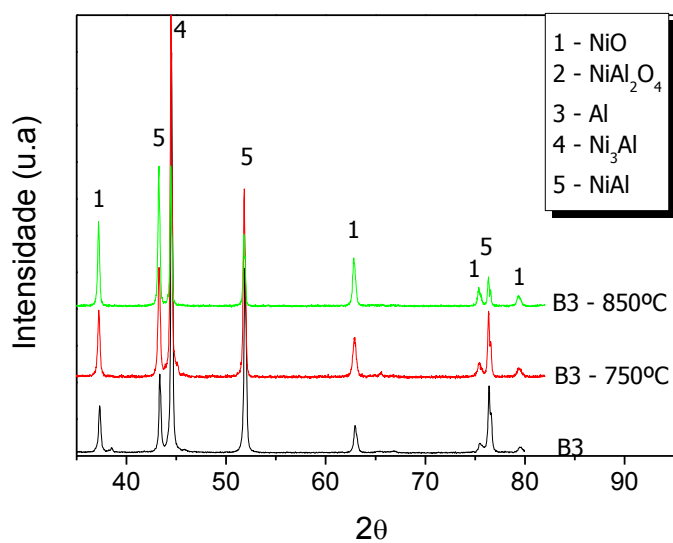


Figura 69 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga B, amostra B3.

Comparando o difratograma das amostras B1, B2 e B3, observa-se que não há mudança de fase.

As Figuras 70, 71 e 72 representam os difratogramas da Liga C. Nota-se que não houve mudança de fase nas amostras que sofreram exposição a 750°C e 850°C.

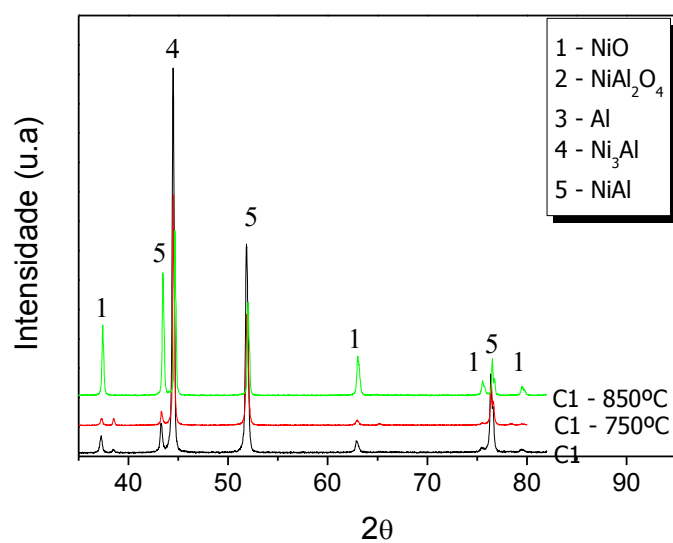


Figura 70 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C1

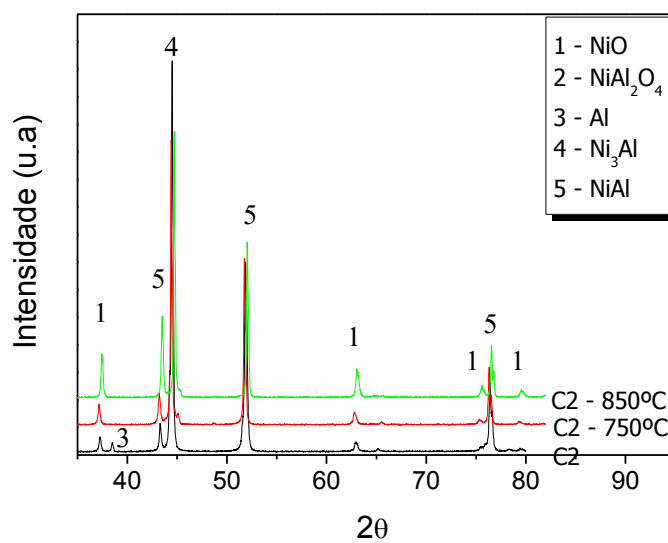


Figura 71 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C2.

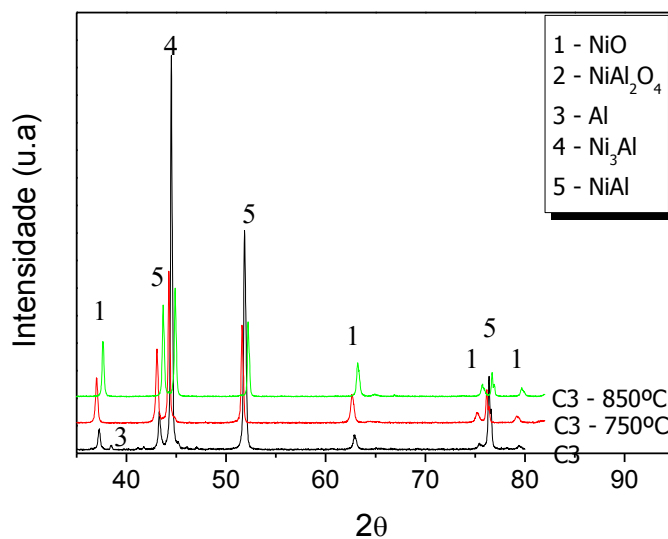


Figura 72 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga C, amostra C3.

Comparando o difratograma das amostras C1, C2 e C3, observa-se que não ocorreu mudança de fase.

As Figuras 73, 74 e 75 representam os difratogramas da Liga D. Nota-se que não houve mudança de fase, mesmo depois da exposição a 750°C e 850°C.

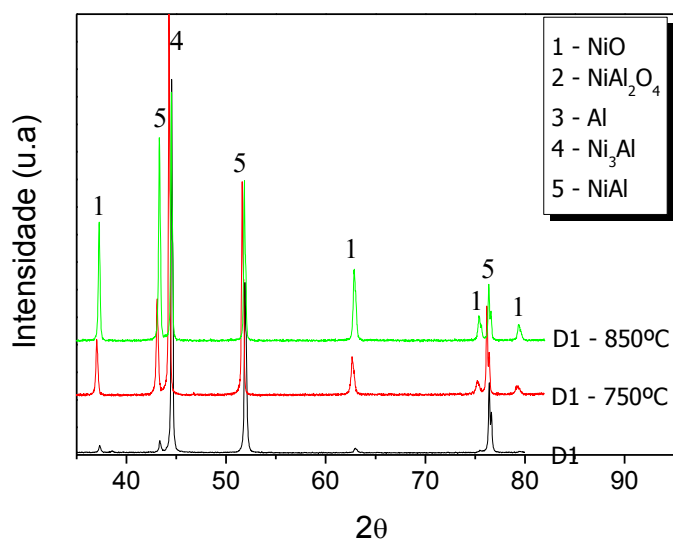


Figura 73 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D1.

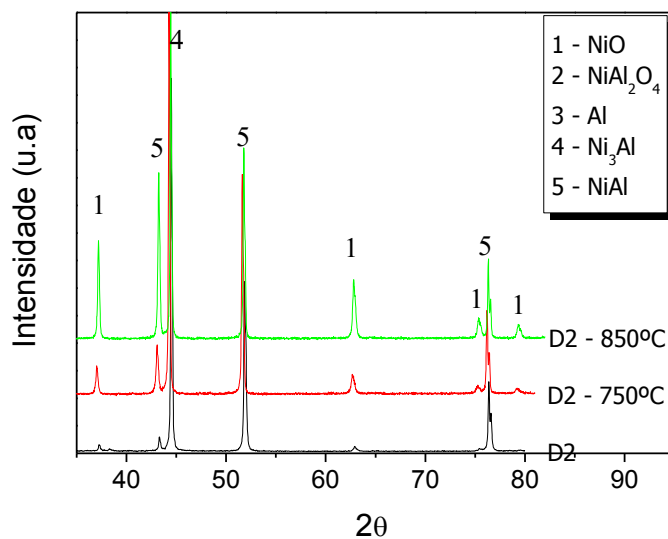


Figura 74 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D2.

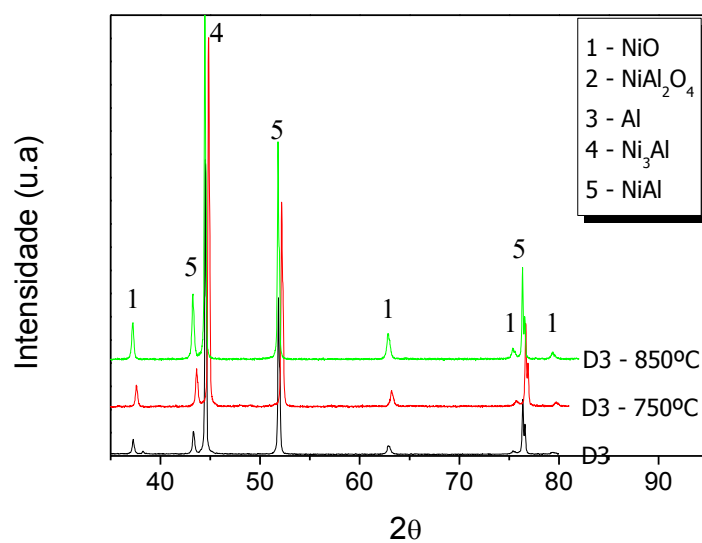


Figura 75 - Difratoograma do revestimento depositado com a liga D, amostra D3.

Comparando os difratogramas das amostras D1, D2 e D3, também nota-se que houve uma mudança na fase.

5 COMENTÁRIOS GERAIS

Através da análise por microscopia ótica, observou-se que a Liga A, comercial Diamalloy 95%Ni5%Al, foi a que apresentou maior presença de óxidos, seguida pela Liga B, 73%Ni27%Al. A Liga D, 95%Ni5%Al, foi a que apresentou menor presença de óxidos.

No ensaio de microdureza Vickers, a Liga A, comercial Diamalloy 95%Ni5%Al, foi a que obteve os maiores resultados, seguida da mistura 73%Ni27%Al, antes da exposição a 750°C e 850°C. Esses resultados são comparáveis a deposições de Ni-Al, pelo processo de AT Plasma PTA (ALMEIDA 2003). Depois da exposição, tanto a 750°C quanto 850°C, ocorreu um aumento na microdureza de todas as Ligas, fazendo com que todas possam ser comparadas ao processo de AT Plasma PTA.

Observando as imagens de MEV + EDS, nota-se que depois da exposição a 750°C e 850°C, ocorreu um aumento no intermetálico NiAl e NiO em todas as amostras.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos e comparando-os com a literatura, através dos ensaios de aderência e microdureza Vickers, e das análises de MO, MEV, EDS, DRX e porcentagem de poros, pode-se concluir que:

Comparando as amostras, nos ensaios antes da exposição a 750°C e 850°C, as amostras que somente sofreram AT com as que sofreram pré-aquecimento e pré e pós-aquecimento conclui-se que: as amostras que sofreram apenas aspersão obtiveram os piores resultados nos ensaios de aderência, porosidade, microdureza e análise microestrutural, porém obtiveram resultados equivalentes aos da literatura. As amostras que sofreram pré e pós-aquecimento, em todos os ensaios, exceto a liga D no ensaio de aderência, tiveram os melhores resultados seguido das amostras que sofreram pré-aquecimento.

A mistura 73%Ni27%Al, Liga B, foi a que obteve melhor resultado no ensaio de aderência, seguida da Liga C, 87%Ni13%Al. O pior resultado desse ensaio foi o da Liga D, 95%Ni5%Al. Esses resultados são comparáveis, segundo a literatura, ao processo de Plasma.

Todas as ligas tiveram porcentagem de poros, abaixo das encontradas na literatura e comparáveis com os processos de Plasma e HVOF.

Por meio das análises de DRX, pode-se confirmar que todas as Ligas formaram o óxido NiO e os intermetálicos NiAl e Ni₃Al. Enquanto na Liga A, Diamalloy 95%Ni5%Al, formou um óxido composto de NiAl₂O₄, as misturas apresentaram um pico de Al. Mesmo depois da exposição a 750°C e 850°C, todas as Ligas se mantiveram estáveis.

Portanto pode-se concluir que os revestimentos produzidos através da aspersão térmica a chama a pó, pela deposição das misturas de pó de Ni e Al e a liga comercial Diamalloy, formam intermetálicos e óxidos, estes mostraram excelente estabilidade térmica na faixa de temperatura testada.

Este estudo mostra que a deposição, por chama a pó pode obter resultados semelhantes aos outros processos de aspersão térmica, e após a exposição às temperaturas de 750°C e 850°C, em forno sem atmosfera controlada, comprova que essas misturas podem ser utilizadas como revestimentos estáveis a altas temperaturas, reduzindo assim o custo final nas aplicações industriais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e da revisão bibliográfica realizada, há algumas sugestões para trabalhos futuros, dando continuidade ao trabalho realizado.

- Fazer aspersão térmica a chama a pó, das misturas utilizadas nesse trabalho, fazendo testes em temperaturas maiores que 850°C e testar esses revestimentos no ensaio de ciclagem térmica, para comprovar a resistência em condições de serviço, a altas temperaturas.
- Estudar a formação de intermetálicos, na chama, antes do impacto com o substrato e a oxidação das partículas depositas, fazendo uma comparação do processo chama a pó com o processo HVOF.
- Estabelecer novos parâmetros de deposição para elevar a aderência do revestimento.
- Estudar a corrosão e o desgaste dos revestimentos obtidos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V. A. B.; **Obtenção in-situ de intermetálicos Ni/Al**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2003.

ASM SPECIALTY HANDBOOK: **Nickel, Cobalt, And Their Alloys**. 414p., 2000.

Aspersão Térmica; Disponível em: < ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/corrosao_prominp/aspersao%20termica.pdf>. Acesso em 23/01/2012.

ASTM C-633. **Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings**. ASTM, 1994.

AWS - American Welding Society –Thermal spraying safety. **Safety and health fat sheet number 20**. 1997.

AWS. **Thermal spraying: practice, theory and application**. cap. 1, p.1- 2. 2002.

BIRKS, N.; MEIER, G.H.; PETTIT, F.S.; **Introduction To The High-Temperature Oxidation Of Metals**. Cambridge University Press. 2nd, 352p, 2006.

CARVALHO, P.R.; **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 306L e AISI 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico**. Recife. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

CHEN, W.; WANG, Y.; **Microstructures, properties and high-temperature carburization resistances of HVOF thermal sprayed NiAl intermetallic-based alloy coatings**. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 183, P. 18-28, 2004.

CORTÉS P. R.; **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha**. Florianópolis. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

COMERSUL; **Plasma - APS e PTA**; Disponível em: <<http://www.comersul.com.br/secao.php?nome=plasma-pta-e-aps>>. Acesso em 23/01/2012.

DEEVI, S.C, SIKKA, V.K., LIU, C.T.; **Processing, Properties and Applications of Nickel and Iron Aluminides**. *Progress in Materials Science*, Vol. 42, pp.177-192. 1997.

DESHPANDEA, S.; SAMPATHA, T. S; ZHANG. H; **Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings—Case study for Ni – Al**. *Surface & Coatings Technology* 200, 5395 – 5406. 2006.

DONG, H.X.; JIANG, Y.; HE, Y.H.; ZOU, J.; XU, N.P.; HUANG; B.Y.; LIU, C.T.; LIAW, P.K.; **Oxidation Behavior Of Porous Nial Prepared Through Reactive Synthesis**. Materials Chemistry and Physics. Vol 122, p.417–423, 2010.

GONG, K, ZHOUB, Z, SHUMB, P.W., LUOC, H, TIANC, Z, LI, C. **Tribological evaluation on Ni₃Al-based alloy and its composites under unlubricated wear condition**, *Wear*. Vol. 270, p.195–203, 2011.

HVOF thermally sprayed bond coats. Surface & Coatings Technology, Vol. 201, p.4694–4701, 2007.

LEAL, E.; NEIVA, L. S.; GAMA, L.; COSTA, A. C. F.M.; **Síntese do catalisador NiAl₂O₄ por reação de combustão variando o teor do combustível ureia**. Artigo publicado na Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.3, 47-55, 2008.

LIMA, C. C., TREVISAN, R.; **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação**. São Paulo – Artliber Editora, 2002.

LIMA, C. R. C; GUILMANY, J.M.; **Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with**. Surface & coatings technology, vol. 201, nº8, pp. 4694-4701. 2007.

LIMA, C. R. P., **Caracterização de coberturas obtidas por aspersão térmica a plasma**. Campinas. Tese de doutorado. UNICAMP, 2001.

MA. K.; SCHOENUNG, J. M.; **Isothermal oxidation behavior of cryomilled NiCrAlY bond coat: Homogeneity and growth rate of TGO**. Surface & Coatings Technology 5178– 5185, 2011.

MARQUES P.V.; **Aspersão Térmica**, Infosolda, 2003.

MENEZES, D. D.; **Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional, em meio Cloreto**. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

NACE. Norma RM 01/70. **Visual standard for surfaces of new steel airblast. cleaned with sand abrasive**. 1970.

NASCIMENTO S. M., MARIANO C. PAREDES R. S. C., **Caracterização Das Propriedades Da Mistura De Feal Depositado Como Revestimento Por Aspersão Térmica A Chama**. Artigo 4 PDPETRO out. 2007.

OKAMOTO, H.; **Al-Ni (Aluminum-Nickel)**. Journal of Phase Equilibria, v.25, n.4, p.394, out. 2004.

PADILHA, H.; **Desenvolvimento “In Situ” de Intermetálicos Ni-Al em Superfícies de Aço Inoxidável Aisi 304 Através da Aplicação por Aspersão Térmica de Mistura de Pós de Níquel e Alumínio**. Curitiba. Tese de Doutorado. Universidade federal do Paraná, 2011.

PAREDES, R. S. C.; **Aspersão Térmica**, Texto Guia da Disciplina de Aspersão Térmica na Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPR (disponível na Biblioteca da UFPR-Centro Politécnico). Universidade Federal do Paraná, 2009.

PAREDES, R.S.C.; AMICO, S.C.; D'OLIVEIRA A.S.; **The Effect Of Roughness And Pre-Heating Of The Substrate On The Morphology Of Aluminium Coatings Deposited By Thermal Spraying**. Surface & Coatings Technology, Vol.200, p.3049–3055, 2006.

PAWLOWSKI, L.; **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition** Lech, 2008.

PENG, X.; WANG, M.; LI, F.; **A Novel Ultrafine-Grained Ni₃Al With Increased Cyclic Oxidation Resistance**. Corrosion Science. Vol. 53, p.1616–1620, 2011.

PETROBRÁS N-2568; **Revestimentos Anticorrosivos Aplicados por Aspersão Térmica**. Petrobrás, 2004.

PHANI, A. R.; PASSACANTANDO, M.; SANTUCCI, S.; **Synthesis and characterization of zinc aluminum oxide thin films by sol-gel technique**. Materials Chemistry and Physics, v.68, p. 66-71, 2001.

PRAXAIR. **HVOF Thermal Spray Process**. 2000. Disponível em: <<http://www.praxairsurface.com.br/pdf/HVOF.pdf>> Acesso em: 01/04/2011.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná, 2003. 118p.

SANTOS, A.O.; **Estudo da resistência à corrosão em aço e revestimentos visando à aplicação em hastes de bombeio de petróleo**. Aracaju. Dissertação de Mestrado. Universidade Tiradentes, 2008.

SANTOS, R. **Formação dos aluminetos de níquel a partir de pós metálicos**. C.Tecn. Mat., vol.22, no.1-2, p.65-76. ISSN 0870-8312, jun 2010.

SOUZA, F.F.; ALMEIDA, V.A.B.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; **Oxidação em Altas Temperaturas de Intermetálicos à Base de NiAl**. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006.

SUCHARSKI, G. B.; **Deposição de Revestimentos tipo Barreira Térmica por Aspersão Térmica**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2012.

SULZER, **Thermal Spray Materials Guide-Metals, Alloys, Composites and Blends /Nickel Base**, p. 50-51, 2010. Disponível em: <<http://www.sulzermetco.com>>, acesso em 25/01/2012.

SULZER METCO, Disponível em: <<http://www.sulzermetco.com>>, acesso em 25/01/2012.

TAMARIN, Y.; **Protective Coatings For Turbine Blades**. ASM International, 1nd, 231p, 2002.

THORPE, M. L.; **Thermal Spray – Industry in transition**. Advanced materials & processes, v. 143, n.5, p.50-61. 1993.

TERRES, C. J. F.; **Avaliação De Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2006.

TREVISANI, E. F.; PAREDES, R. S. C.; AGUIAR, L. A.; SUCHARSKI, G. B.; PADILHA, H.; CARDOZO, M. A.; CAPRA, A. R.; **Evaluation of NiAl Alloys Used as Resistant Coating Deposited by Powder Flame Spraying**. 21st Brazilian Congress of mechanical Engineering October 24-28, Natal, RN, Brazil. 2011.

ZEEMANN, A.; **Corrosão em juntas soldadas**. Infosolda. 2003. Disponível em < [http:// www.infosolda.com.br/artigos/mealsol08.pdf](http://www.infosolda.com.br/artigos/mealsol08.pdf)>. Acesso em 15/01/2012.